

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Rede de Sensores Móveis

Tiago Joaquim Pereira de Sousa

Dissertação/Relatório de Projecto realizada(o) no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Automação

Orientadores INESC: Doutor Ireneu Dias e Doutor Sérgio Mendonça
Orientador FEUP: Professor Doutor Armindo Lage

Junho de 2008

A Dissertação Intitulada

“Redes de sensores móveis”

foi aprovada em provas realizadas em 15/Julho/2008

o júri

Presidente Professor Doutor Américo Lopes de Azevedo
Professor Associado Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor José Alberto Gouveia Fonseca
Professor Associado da Universidade de Aveiro



Professor Doutor Armindo Luís Vilar Soares Lage
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados.

Autor - Tiago Joaquim Pereira de Sousa



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

A automatização dos processos implica a monitorização de grandezas físicas variadas. A medição dessas grandezas é um factor decisivo na qualidade do controlo sendo por isso necessários instrumentos com capacidades sensoriais, de fácil instalação, robustos, de dimensões reduzidas e de baixo custo.

As redes de sensores preenchem todos os requisitos supracitados, sendo uma tecnologia em expansão e de elevado impacto no futuro. Por esse motivo, grandes investimentos estão a ser feitos nesta área para permitir a sua adaptação a diversas aplicações, como agricultura, estruturas, etc. A possibilidade da mobilidade dos nós sensores permite diferenciar este projecto de outros produtos e é particularmente importante em aplicações onde os objectos a monitorizar se encontram em movimento.

A rede de sensores desenvolvida nesta dissertação é constituída por unidades móveis, com sensores instalados, e por uma unidade central, onde o utilizador recebe os dados. Neste mestrado é descrita a metodologia no desenvolvimento do hardware, do software e do protocolo de comunicações seguida para alcançar os objectivos propostos.

Abstract

The automation of the process involves the monitoring of different physical values. The measurement of such quantities thus becomes a decisive factor in quality of the control. They are then required instruments with sensory capabilities, easy to install, robust, small and low cost.

The wireless sensor networks meet all the requirements mentioned above, and are an expansion in technology with high impact in the future. Therefore large investments are being made in this area, to allow the adaptation to different areas of application, such as agriculture, infrastructure, etc. The possibility of mobility of the sensors helps to differentiate it from other products, and is particularly important in applications where the objects to monitor are in motion.

The network of sensors developed in this dissertation consists of mobile units, with sensors installed, and a central unit, where the user receives the data. In this thesis the methodology in the development of hardware, software and protocol of communications, is described, followed by the objectives achieved.

Agradecimentos

Se este estudo foi facilitado pelo gosto de desenvolver saberes, ele não seria possível sem a ajuda, da família que, no dia a dia, me transmitiu força e carinho; do Doutor Ireneu Dias, do Doutor Sérgio Mendonça e do Doutor Armindo Lage que me orientaram, incutindo e dando confiança; do grupo UOSE do INESC Porto que tão bem me acolheu; dos amigos e colegas, de quem ouvi palavras de estímulo ao longo da elaboração desta tese de dissertação.

Índice

Resumo	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos	ix
Índice.....	xi
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xv
Abreviaturas e Símbolos	xvii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1- Motivação	1
1.2- Objectivos.....	2
1.3- Estrutura	3
Capítulo 2	5
Redes de Sensores	5
2.1- Desenvolvimento das redes sem fios	5
2.2- Desenvolvimento de redes de sensores	6
2.3- Arquitectura	8
2.4- Sistema de armazenamento ou produção de energia	10
2.5- Aplicações	14
2.6- Alguns grupos de investigação e seus produtos.....	15
Capítulo 3	17
Hardware	17
3.1- Microcontrolador.....	17
3.2- Outros Componentes	19
3.2.1- <i>Acelerómetro</i>	20
3.2.1.1- <i>Modo funcionamento</i>	20
3.2.1.2- <i>Circuito do acelerómetro</i>	21
3.2.1.3- <i>Determinação da aceleração</i>	21
3.2.2- <i>Sensor humidade/ temperatura</i>	22
3.2.2.1- <i>Modo de funcionamento</i>	22
3.2.2.2- <i>Determinação da temperatura/humidade</i>	23

3.2.3-	<i>Luminosidade</i>	24
3.2.3.1-	<i>Modo funcionamento</i>	24
3.2.3.2-	<i>Determinação da luminosidade</i>	24
3.2.4-	Medição da corrente de consumo.....	25
3.2.4.1-	Modo de funcionamento.....	25
3.2.5-	Comunicações Rádio Frequência	26
3.2.5.1-	Descrição.....	26
3.2.5.2-	Escolha do componente	28
3.2.6-	Alimentação	29
3.3-	Estudos efectuados	29
3.4-	Arquitectura	32
3.5-	Placas de circuito impresso	34
Capítulo 4	39
Software		39
4.1. Programa estações móveis		39
4.1.1- <i>Descrição</i>		39
4.1.2- <i>Diagrama de estados</i>		41
4.1.2.1- <i>Controlador</i>		41
4.1.2.2- <i>Acelerómetro</i>		43
4.1.2.3- <i>Luminosidade</i>		45
4.1.2.4- <i>Humidade/ temperatura</i>		47
4.1.2.5- <i>Recepção de dados pela rede</i>		49
4.1.2.6- <i>Enviar dados</i>		50
4.1.3- Protocolo de comunicação de dados		52
4.1.4- Memória		53
4.2. Programação estação base		54
4.3. Validação de resultados		57
Capítulo 5	59
Conclusões e Trabalho Futuro		59
6.1. Conclusões		59
6.2. Trabalho futuro		60
Referências		63
Anexos		67

Lista de figuras

Figura 1 - Constituintes do sistema.....	2
Figura 2 - Unidade sensora do projecto DNS em 1985 (1)	7
Figura 3- Unidades essenciais de uma rede de sensores sem fios (3)	8
Figura 4- Modelo de geração de energia através da energia de vibração (11).....	12
Figura 5 - Modelo eléctrico do sistema de produção de energia através da energia de vibração (11)	12
Figura 6 - Painéis solares para a alimentação do nó da rede (13)	12
Figura 7 - MSP430 (32)	17
Figura 8 - Imagem da placa de desenvolvimento do MSP430F449 (33).....	19
Figura 9 - Funcionamento interno de um acelerómetro	20
Figura 10 - Diagrama de blocos do acelerómetro (36)	21
Figura 11 - Diagrama de blocos do sensor SHT71 (37).....	23
Figura 12 - Diagrama de blocos do sensor de luminosidade (38)	24
Figura 13 - circuito para a medição da corrente de alimentação (39)	26
Figura 14 - Frequências legais em cada continente (32).....	27
Figura 15 - Circuitos de teste ERx00TRS-02	29
Figura 16 - Circuito de acoplamento do regulador de tensão LM3940 (41).....	29
Figura 17 - Fluxo de informação dos componentes da unidade móvel	33
Figura 18 - Fluxo de informação dos componentes da unidade fixa	34
Figura 19 - Circuito de teste dos sensores.....	35
Figura 20 - Circuito das unidades móveis.....	37
Figura 21 - Controladores estação móvel.....	40

Figura 22 - Diagrama de estados do controlador da estação base	43
Figura 23 - Diagrama de estados do driver do acelerómetro	44
Figura 24 - Método de aproximações sucessivas (43).....	45
Figura 25 - Diagrama de estados do driver do sensor de luminosidade	45
Figura 26 - ligação eléctrica segundo o protocolo I2C	46
Figura 27 - Informação no barramento de dados do protocolo I2C (44)	47
Figura 28 - Diagrama de estados do driver do sensor de luminosidade	47
Figura 29 - Ligação física entre o sensor SHT71 e o microcontrolador (37)	48
Figura 30 - Descrição do protocolo do sensor de temperatura e humidade (37)	48
Figura 31 - Diagrama de estados do processo de recepção de dados	50
Figura 32 - Diagrama de estados do processo de enviar os dados.....	51
Figura 33 - Diagrama de sequências das comunicações entre uma estação base e uma estação móvel	52
Figura 34 - Estrutura da memória.....	54
Figura 35 - Constituição da estação base.....	54
Figura 36 - Janela principal da aplicação da estação base.....	55
Figura 37 - Menu Configuração	56
Figura 38 - Janela de Configuração do modo de funcionamento dos sensores	56
Figura 39 - Janela de apresentação dos dados	57
Figura 40 - Plano Inclinado.....	57

Lista de tabelas

Tabela 1 - Informação relativa à potência disponibilizada por diversas fontes de energia (11)	11
Tabela 2 - Determinação do valor da luminosidade	24
Tabela 3 - Memória necessário para cada sensor	30
Tabela 4 - Tempo de funcionamento dos sensores	31
Tabela 5 - Saídas conector J2 da placa protótipo.....	36
Tabela 6 - Saídas conector J3 da placa protótipo.....	36
Tabela 7 - Descrição dos sinais usados no protocolo I2C.....	47
Tabela 8 - Descrição dos sinais usados no protocolo de comunicação com o sensor de temperatura e humidade	49
Tabela 9 - Códigos usado nas comunicações	53
Tabela 10 - Formato das tramas	53
Tabela 11 - Resultados dos testes obtidos com o acelerómetro.....	58

Abreviaturas e Símbolos

ADC	Analog to Digital Converter
ASPLOS	Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems
AWACS	Airborne Warning and Control System
BOR	Brown Out Reset
CSV	Comma Separated Value
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DSN	Distributed Sensor Network
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GPRS	General Packet Radio Service
GUI	Graphical User Interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc
INESC	Instituto de Engenharia e Sistemas de Computadores
IP	Internet Protocol
IPTO	Information Processing Techniques Office
JTAG	Joint Test Action Group
MEMS	Microelectromechanical systems
MIT	Massachusetts Institute of Technology
PCB	Printed Circuit Board
RISC	Reduced Instruction Set Computer
SAR	Successive-approximation-register
SOSUS	Sound Surveillance System
SPI	Serial Peripheral Interface Bus
TCP	Transmission Control Protocol
UAV	Unmanned Surveillance System
UOSE	Unidade de Optoelectrónica e sistemas electrónicos

Capítulo 1

Introdução

1.1- Motivação

As redes de sensores são consideradas como uma das tecnologias importantes para o futuro. Grandes investimentos estão a ser feitos nesta área, que vão permitir melhorar a eficiência do funcionamento e a redução dos custos. A utilização de componentes de baixo custo e inteligentes, aliada a ligações em rede como a Internet, abrem portas para uma nova era do controlo e instrumentação de habitações, cidades e ambiente. Por outro lado, a utilização e aplicação nas redes de acesso restrito, melhora os sistemas de defesa, as técnicas de reconhecimento e os sistemas de vigilância.

Outras aplicações e vantagens das redes de sensores estão relacionadas com a sua robustez, o baixo custo de instalação e a possibilidade de utilização em várias situações (em terra, na água, no ar, dentro de organismos vivos, em veículos e dentro de edifícios).

Estes circuitos sensores comunicam através de redes com ou sem fios. No entanto, prevê-se uma maior utilização e evolução de redes de sensores sem fios, devido às suas reduzidas dimensões e à sua facilidade de instalação e de manutenção.

Actualmente esta tecnologia encontra-se em grande desenvolvimento, dada a importância nos processos industriais, quer para aumentar o rendimento dos processos ou quer para garantir a segurança dos trabalhadores. No dia a dia vai permitir melhorar a qualidade de vida dos cidadãos, ao monitorizar e alertar situações de risco.

Este trabalho foi proposto pela Unidade de Optoelectrónica e de Sistemas Electrónicos (UOSE) do Instituto de Engenharia e Sistemas de Computadores do Porto (INESC Porto), tendo como objectivo desenvolver um sistema com capacidades de integrar sensores, ou outros componentes desenvolvidos nesta unidade, valorizando assim a oferta de novos produtos e complementando a tecnologia de sensores baseada em fibra óptica.

1.2- Objectivos

O objectivo deste projecto é desenvolver um sistema, fiável e de baixo custo, constituído por vários nós que efectuem medições de grandezas físicas, com capacidade de armazenamento de dados e posterior envio para uma estação base.

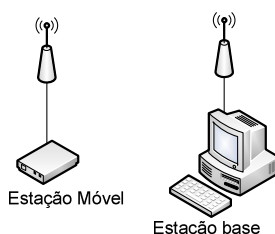


Figura 1 - Constituintes do sistema

Sendo assim, o sistema vai ser constituído por várias unidades móveis e autónomas, instaladas no terreno onde se procede à recolha de dados, e por uma estação base. A comunicação entre as várias estações é sem fios.

A energia consumida em cada estação móvel deve ser minimizada de modo a otimizar o tempo de funcionamento do sistema sem necessitar de manutenção, permitindo assim um funcionamento autónomo de recolha de dados em locais afastados da estação base durante períodos de tempo que se pretendem o mais longo possível. Posteriormente, o utilizador, na estação de base, tem acesso a todos os dados recolhidos no terreno. Prevê-se que no futuro seja permitido utilizar recursos como UAV (unmanned aerial vehicles) para recolher dados de estações móveis fora do alcance de comunicação com a estação base.

A memória do microprocessador é otimizada de forma a permitir uma maior longevidade do sistema e evitar o uso de uma memória externa, o que aumentaria o consumo energético do mesmo.

A estação base será programada com um “software” de arquitectura modular, tendo assim um controlador encarregado de todo o processamento necessário. Cada sensor terá um módulo apropriado, responsável pela comunicação entre este e o microprocessador. Deste modo, o sistema terá flexibilidade de modo a permitir a utilização e substituição dos circuitos bases, o que possibilita a sua futura reestruturação ou expansão.

A estação móvel será reconfigurada on-line, apenas por alteração das variáveis do controlador da estação móvel, permitindo assim:

- Alterar intervalos de tempo entre medidas;
- Efectuar continuamente a medida de uma grandeza durante um determinado intervalo de tempo, no caso desta ultrapassar um valor limite definido pelo utilizador.

Neste projecto as unidades móveis vão ser equipadas com sensores das seguintes grandezas:

- Temperatura
- Humidade
- Aceleração
- Luminosidade

A estação base será constituída por um computador ligado a um transceptor (emissor/receptor) de rádio-frequência. Neste computador, é efectuado todo o processamento necessário para a compreensão e armazenamento dos dados, que são depois apresentados ao utilizador. Os dados recebidos são copiados para um ficheiro de formato comma-separated values (CSV) para manuseamento e análise futuros.

Na estação base será desenvolvida uma Interface Gráfica para o utilizador na qual é possível reconfigurar a estação móvel e pedir os dados recolhidos.

1.3- Estrutura

Esta dissertação apresenta-se estruturada em seis capítulos.

No segundo capítulo começa-se por fazer uma breve descrição sobre a tecnologia usada no desenvolvimento de uma rede de sensores sem fios, seguida da descrição de várias arquitecturas possíveis. Termina apresentando aplicações desta tecnologia.

No terceiro capítulo, descrevem-se os componentes que vão integrar todas as unidades do sistema. É também apresentado o estudo realizado sobre o consumo energético e os recursos de memória das unidades móveis.

No capítulo quatro, são apresentados os algoritmos de programação que serão utilizados tanto na estação base como nas estações móveis.

Finalmente, no último capítulo, faz-se uma análise crítica aos resultados obtidos e ao desenvolvimento do projecto. Perspectiva-se também o trabalho futuro e a sua aplicabilidade a novas situações.

Capítulo 2

Redes de Sensores

O desenvolvimento de redes de sensores exige tecnologias e conhecimentos de três áreas diferentes: Sensores, Comunicação e Computação (hardware, software e algoritmos). As primeiras redes de sensores foram criadas ainda antes desta denominação ter aparecido. A rede de radar usada no controlo do tráfego aéreo pode ser considerada como uma das primeiras e a rede eléctrica pode ser considerada como uma das maiores (1).

2.1- Desenvolvimento das redes sem fios

As aplicações militares estiveram na génese das redes sem fios. No início do século XX, o exército dos Estados Unidos da América desenvolveu um sistema de rádio-frequência para as comunicações entre as bases e as chefias do exército. Estas comunicações eram efectuadas recorrendo à utilização do código de Morse e a rede era mantida por rádio amadores, que tinham a responsabilidade de manter os nós operacionais (2).

A estrutura da rede era em árvore e a mensagem era enviada com o endereço do destino, e difundida pela rede através dos nós sendo o caminho gerido pelos rádios amadores. Estes apenas podiam comunicar com um nó do nível superior ou inferior mas nunca com um nó do mesmo nível. As mensagens eram remetidas a uma hora e frequência previamente marcadas (2).

Mais tarde, depois de algumas adaptações, foi alterada a forma de acesso à rede sendo permitida a comunicação sem combinação prévia (2).

As redes anteriores eram utilizadas tanto para instruções militares como também para comunicações para/de locais de catástrofe. O problema na sua utilização era o prolongado tempo de entrega da mensagem, resultante do facto da rede ser controlada por operadores, que atrasavam as comunicações, de acordo com o número de mensagens a enviar ou a receber (2).

Nos anos 70 foram desenvolvidas as primeiras redes de comunicações de dados, possibilitando o envio de pacotes de dados a maior velocidade permitindo a transmissão de ficheiros, sem depender de operadores. Todo o processo de transmissão era então automático deixando de ser necessária a combinação de horas e de frequências para o envio dos dados. Deste modo, o controlo da comunicação era maior, permitindo então a detecção de erros e a definição do caminho mais curto (2).

No ano 1990, o IEEE criou o grupo de desenvolvimento 802 LAN/MAN, responsável pela uniformização das comunicações de rede, entre elas da rede sem fios. Em 1997, o documento elaborado pelo grupo de trabalho foi aprovado e permitiu assim a realização de comunicações “wireless” de 1 e 2 Mb/s. Desde então, as velocidades de comunicação aumentaram sendo neste momento permitida a comunicação até 54 Mb/s, com um alcance razoável.

2.2- Desenvolvimento de redes de sensores

As tecnologias desenvolvidas inicialmente para fins militares, constituíram um motor de desenvolvimento nas redes de sensores.

Durante a guerra fria, foi instalado um sistema de sensores acústicos (hidrofones), em locais estratégicos no fundo dos oceanos, para detecção de submarinos inimigos. Este programa foi chamado de SOSUS (Sound Surveillance System) e é actualmente utilizado para monitorizar acontecimentos no fundo do oceano (movimento de animais, actividade sísmica...).

Nos Estados Unidos e no Canadá, ainda durante a guerra fria, foram instalados redes de defesa aérea, com radares, para protecção de ataques de aviões. Ao longo dos anos os sistemas de defesa aéreos tornaram-se cada vez mais sofisticados, incluindo aeróstatos com sensores e aviões AWACS (Airborne Warning and Control System). Este sistema foi mais tarde alterado permitindo a sua utilização no controlo de aeronaves que sobrevoavam países sem autorização (1).

As redes de sensores eram baseadas em estruturas hierárquicas de processamento que ocorria em níveis consecutivos, terminando quando a informação dos acontecimentos chegava ao utilizador. Na maioria dos casos, os operadores humanos desempenham um papel fundamental em todo o sistema (1).

A investigação de redes de sensores mais modernas, começou por volta de 1980 com o programa Distributed Sensor Network (DSN) realizado pela Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). Nesta altura, a rede ARPANET (rede que precedeu a Internet) já estava operacional. R. Kahn, director do IPTO (Information Processing Techniques Office) e um dos co-inventores do protocolo TCP/IP, utilizou a rede Arpanet para comunicação entre módulos de sensores.

O programa DSN identificou os componentes tecnológicos necessários, que incluíam sensores acústicos, protocolos de comunicação de alto nível, algoritmos e técnicas de

processamento e software distribuído. Na altura não estava disponível toda a tecnologia necessária para construir um módulo sensor e decidiram criar um sistema que identifica um objecto através da acústica (1).

Os investigadores da Carnegie Mellon University (CMU) trabalharam no desenvolvimento de uma rede de comunicação flexível, reconfigurável e que colmatasse a falhas do sistema DSN (1).

O Massachusetts Institute of Technology (MIT), desenvolveu um sistema capaz de detectar e seguir um objecto através da análise do sinal e da comparação destes, usando um conjunto de microfones. No final dos anos 80, este sistema foi testado através do programa DNS, tendo sido possível detectar e seguir o movimento de um avião a baixa altitude, usando uma rede de sensores e um processamento centralizado (1).

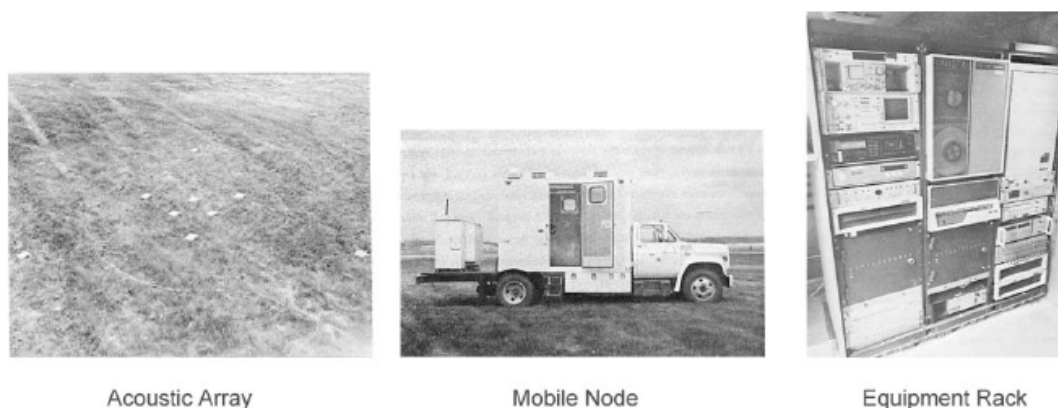


Figura 2 - Unidade sensora do projecto DNS em 1985 (1)

Recentemente, os avanços na computação e nas comunicações permitiram o desenvolvimento das redes de sensores. Estes apresentam-se com dimensões cada vez mais reduzidas e com um custo menor, e alguns adoptam a tecnologia MEMS (microelectromechanical system) e de redes sem fios. Os processadores de baixa potência e de baixo custo são então o fundamento do já mencionado desenvolvimento das redes de sensores, que assim podem ser aplicadas nas mais variadas situações (1).

Podem ser encontradas diferenças entre os nós sensores dos anos 80/90 e os actuais, sendo a principal a diminuição substancial do tamanho, do peso e do custo. A arquitectura do nó, separava inicialmente a sensorização, o processamento e a comunicação. Hoje, estes três processos integraram-se. A topologia da rede também foi alterada, tal como o tipo de alimentação e a longevidade (passou de grandes baterias com uma capacidade de horas ou dias, para baterias do tipo AA, com capacidade de semanas). Contudo, a maior evolução é a automatização, que se traduz numa menor dependência do sistema relativamente ao homem (1).

2.3- Arquitectura

A rede de sensores sem fios é constituída essencialmente por sensores, circuitos de processamento de sinal, comunicação sem fios e sistema de gestão de energia, devendo ter dimensões o mais reduzidas possíveis. Para os três primeiros componentes supracitados é possível minimizar o seu tamanho, aplicando várias tecnologias recentes, como a utilização de systems-on-chip, MEMS e ASIC's. O problema coloca-se, então, em relação à dimensão do sistema de alimentação, que depende também, da longevidade do funcionamento que se pretende. Este sistema de armazenamento de energia pode passar pela produção de energia junto dos nós da rede ou pela utilização de baterias.

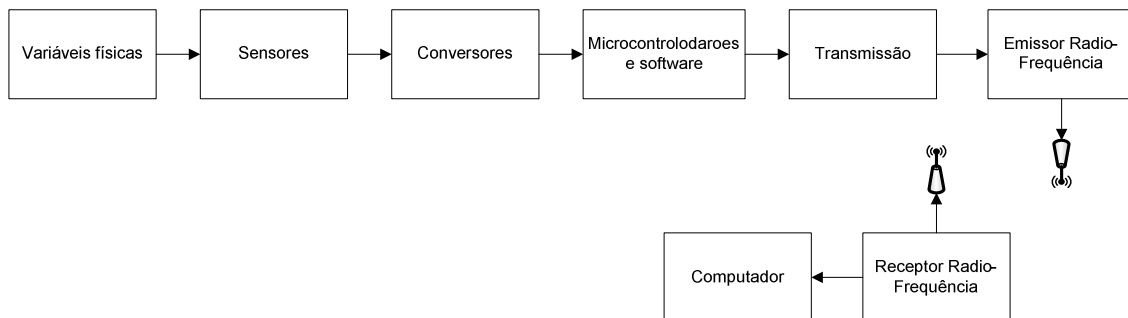


Figura 3- Unidades essenciais de uma rede de sensores sem fios (3)

No desenvolvimento das estações sensoras de uma rede sem fios tem-se em consideração os seguintes requisitos, propostos pela ASPLOS (4):

- Pequeno tamanho e baixa potência consumida - este requisito influencia o número de componentes de hardware a utilizar e exige uma melhor optimização do software que controla a estação. Implica também uma utilização eficiente tanto da unidade de processamento como das comunicações e da memória;
- Operações concorrentes - A comunicação da informação entre dispositivos deve ser efectuada com o menor processamento possível, implementando um sistema “on-the-fly” em vez do tradicional “comando-stop-pensa-responde”. Por exemplo, a informação é lida no sensor, empacotada e depois enviada através da rede, diminuindo assim o tamanho da memória necessária. Outro exemplo é uma rede “multi-hop” ou “bridge”, onde a informação recebida por uma estação intermédia é imediatamente enviada, sem recorrer a memórias intermédias;
- Limitação dos paralelismos físicos e hierarquia de controladores - Os actuais sistemas de processamento apresentam um elevado número de controladores,

assim como grande capacidade e sofisticação. No entanto, em aplicações de redes sem fios esta tecnologia não é necessária, já que os sensores têm uma interface de comunicação bastante primitiva, que permite a ligação directa ao microcontrolador, e evita a utilização de barramentos de comunicação;

- Diversidade do Design e utilização - cada aplicação de redes de sensores sem fios tem as suas características, que influenciam a arquitectura dos seus nós, mas tornam difícil desenvolver uma arquitectura que consiga abranger todas as áreas de aplicação. Assim deve-se apostar no desenvolvimento de unidades sensoras modulares, que permitam fácil alteração dos componentes da unidade e com capacidades de adaptação a diferentes utilizações;
- Operação robusta - A maioria dos dispositivos de uma rede funciona sem intervenção humana. No entanto, espera-se que estes elementos tenham um período de operação elevado. Por isso, deve-se criar sistemas de redundância, ou seja sistemas onde uma falha local não impeça o funcionamento da unidade.

Relativamente à caracterização e ao funcionamento da rede, definem-se os seguintes parâmetros (5):

- Dinâmica de rede - numa rede dinâmica, a comunicação é permitida enquanto a estação de sensores está em movimento. Neste caso, é necessário garantir a estabilidade da rede em condições adversas e permitir flutuações na largura de banda e na energia gasta. Deste modo, o funcionamento de uma rede dinâmica é naturalmente diferente do de uma rede estática;
- Posições dos nós - as estações da rede podem ser colocadas ou em locais pré-determinados pelos utilizadores, em que cada nó sabe com quem deve comunicar, ou aleatoriamente numa determinada área, sendo a rede responsável pela organização das comunicações;
- Envio dos dados registados - o envio dos dados recolhidos pode ser efectuado de modo contínuo, iniciado pela ocorrência de um evento, por um pedido feito pelo utilizador ou de uma forma híbrida das hipóteses anteriores.

Os protocolos de comunicação, tendo em conta as suas características, são divididos nos diferentes grupos (5):

- Datacêtricos - Neste protocolo, a estação base envia um pedido de leitura para um determinado local onde existem nós da rede e todas as estações ali presentes respondem. Exemplo de redes que se enquadram neste protocolo

são as Sensor Protocols for Information via Negotiation (6) e Directed Diffusion (7);

- Hierárquicos - Nesta rede, os nós estão agregados em grupos e apenas comunicam com um nó de nível superior. Dentro dos grupos, os nós podem estar organizados de diferentes formas. O protocolo Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (8) pertence a este grupo;
- Baseados na localização - Neste protocolo, é calculada a localização do nó, para que, caso haja necessidade de comunicação, seja possível determinar a distância entre o emissor e o receptor, e assim determinar o caminho óptimo para realizar esta operação. Este protocolo também permite o redireccionamento das mensagens para o local geográfico, onde se deseja realizar a medida. As redes Minimum Energy Communication Network (9) e Geographic Adaptive Fidelity (10) usam esta tecnologia;
- Protocolos com cuidados de gestão de rede, e da qualidade do serviço - Este protocolo constitui uma versão melhorada dos protocolos apresentados anteriormente, no que respeita à qualidade do serviço e gestão da rede.

2.4- Sistema de armazenamento ou produção de energia

O sistema de alimentação dos nós de uma rede de sensores “wireless” é uma das partes mais complexas no desenvolvimento do sistema. Isto porque a minimização do consumo nos circuitos é essencial.

Para aumentar a autonomia dos nós, várias evoluções estão a ser feitas na produção local de energia, no seu armazenamento e no controlo dos gastos energéticos da unidade.

Na tabela 1 encontra-se a informação relativamente à energia disponibilizada por diversas fontes de energia.

		<i>Densidade de potência (uW/cm²) 1 ano de funcionamento</i>	<i>Densidade de potência (uW/cm²) 10 ano de funcionamento</i>
Produção de energia	Energia solar (fora de edifícios)	15,000 - sol directo 150- com nuvens	15,000 - sol directo 150- com nuvens
	Energia solar (dentro de edifícios)	6	6
	Vibração	100-200	100-200
	Ruído	0,003 @ 75dB	0,003 @ 75dB
	Variação da temperatura	10	10
	Variação do gradiente de temperatura	15 @ gradiente 10°C	15 @ gradiente 10°C
Baterias	Fontes nucleares	850,000 (8% rendimento)	850,000 (8% rendimento)
	Bateria de Lítio	89	7
	Combustão (μ-engine)	403	40,3
	Células de combustível (Metanol)	560	56

Tabela 1 - Informação relativa à potência disponibilizada por diversas fontes de energia (11)

Um sistema de alimentação constituído por baterias, embora disponibilize mais energia à unidade tem um menor tempo de vida, o que limita a duração do funcionamento da unidade.

A produção local de energia e armazenamento, gerada a partir de grandezas ambientais como calor, luz, ruído, ondas de rádio, vibração, entre outras, é a melhor opção pois permite um funcionamento contínuo de maior duração e está disponível mesmo em locais mais remotos, diminuindo assim a frequência com que é necessária efectuar manutenção das estações (11; 12).

A produção de energia através das vibrações é bastante atractiva, dada a sua abundância e a existência de várias técnicas baseadas em piezoelectricos, ou em transdutores electrostáticos e electromagnéticos.

O desenvolvimento das MEMS impulsionou a utilização destas tecnologias, já que os instrumentos para produzirem energia diminuiram substancialmente de dimensões (11) .

Nas figuras 4 e 5, está demonstrado um sistema de produção de energia, constituído por ímans e bobinas. A bobina está colocada num material ressonante, que vibra quando é perturbado por algum movimento e provoca a oscilação da bobine. Graças a este movimento e à presença de um campo magnético criado pelo íman, é induzida uma corrente eléctrica com uma determinada tensão.

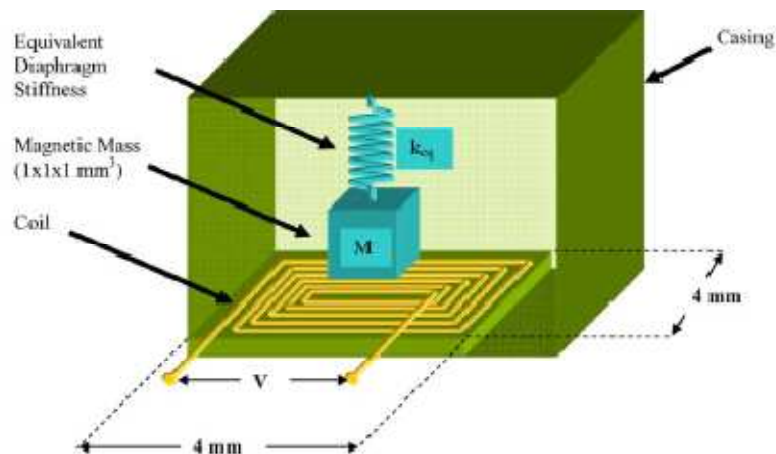


Figura 4- Modelo de geração de energia através da energia de vibração (11)

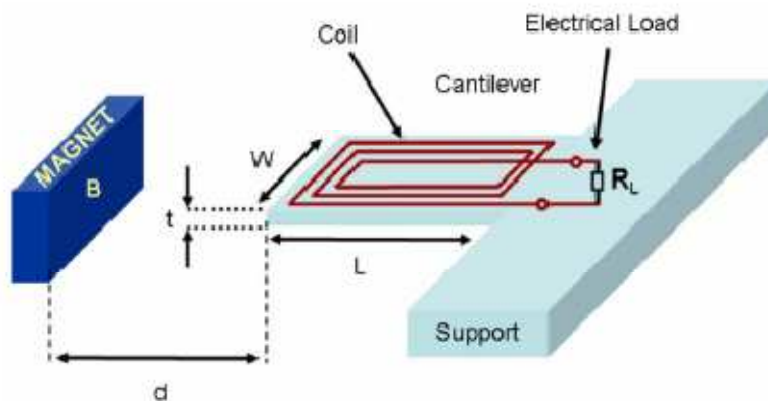


Figura 5 - Modelo eléctrico do sistema de produção de energia através da energia de vibração (11)

Os painéis solares, embora bastante desenvolvidos, apresentam a desvantagem da produção de energia não ser contínua, que implica o seu armazenamento em baterias ou em condensadores (12).

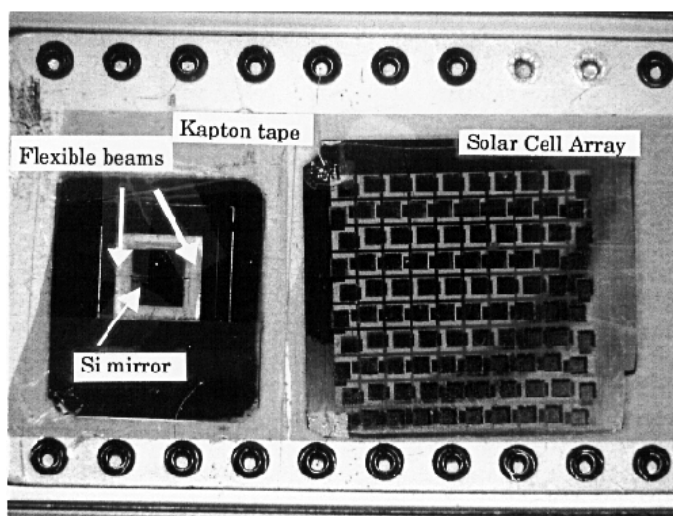


Figura 6 - Painéis solares para a alimentação do nó da rede (13)

Um dos motivos que origina o aumento do consumo de potência nos nós da rede é provocado pela comunicação dos dados. Existem dois tipos de comunicação de dados sem fios, com as suas vantagens e desvantagens e que apresentam consumos diferentes (12):

- Por rádio-frequência, que tem um bom alcance, mas o consumo é bastante elevado durante a transmissão;
- Por transmissão dos dados por via óptica, com um gasto energético bastante inferior. No entanto os equipamentos para comunicarem entre si, necessitam de ter uma linha de vista e o emissor/receptor tem de estar devidamente alinhados, para garantir a comunicação.

Sendo o módulo de comunicações o maior consumidor de energia do sistema, usam-se protocolos que sejam eficientes.

A topologia de rede também influencia os consumos de um nó da rede.

Um outro método para diminuir a energia consumida nas estações, passa pela exploração da capacidade de “sleep” de todos os componentes, já que com este modo de funcionamento estes só consomem a energia necessária para se manterem ligados.

No modelo de consumo energético de uma estação da rede identificam-se cinco estados diferentes (12):

- Aquisição - determinação das grandezas físicas, processamento necessário e gravação dos dados na memória;
- Transmissão - todo o processamento necessário para preparação dos dados a serem enviados e seu envio;
- Recepção - análise de toda a informação que é recebida, todo o processamento necessário para a compreensão dos dados. Mesmo que a mensagem não se destina a uma base, sempre que existam dados a serem transmitidos, este estado é utilizado;
- Ouvindo - No caso dos dados não serem para uma estação base, esta está neste estado até ao fim dessa mensagem;
- Sleeping - O sistema apenas é alimentado para manter o funcionamento básico.

Existe já um sistema operativo, TinyOS (14) desenvolvido para estações remotas de redes de sensores. Este sistema possui as bibliotecas para protocolos de rede, os drivers de sensores e os sistemas de aquisição de dados. O modelo de execução é orientado ao evento, facilitando assim a poupança de energia. O TinyOS tem versões compatíveis com algumas plataformas, que incluem Eyes (15), TMote Sky (16), MicaZ (17) e o iMote. Estas plataformas

são constituídas apenas pelas unidades de processamento, tendo depois disponíveis drives com sensores, que o utilizador pode instalar.

2.5- Aplicações

Inicialmente, as redes de sensores foram desenvolvidas para fins militares. No entanto, a democratização desta tecnologia, tornou possível a sua aplicação nas mais diversas áreas (12):

- Segurança de edifícios e de estruturas - protecção e vigilância contra possíveis ameaças. Utilizando uma boa distribuição dos nós de sensores, diminui-se também a quantidade de falsos alarmes;
- Monitorização de habitats, ambiente e agricultura inteligente - uma das principais aplicações pois as variáveis a medir, como temperatura, humidade, entre outras, variam de local para local. Aplicam-se no estudo das variações dos comportamentos de plantas ou animais a alterações climáticas ou pragas, na detecção dos níveis de poluição de uma área (sensores químicos) e na inferência da falta de nutrientes essenciais para o desenvolvimento normal de uma planta na agricultura. A monitorização ambiental pode ainda ser usada para a detecção de tráfico de substâncias ilegais;
- Sensorização industrial - integração de sensores nas máquinas de produção, realizando o controlo de qualidade dos produtos, assim como o controlo e manutenção das máquinas, permitindo assim a redução de custos e o aumento da operacionalidade das máquinas;
- Controlo de tráfego - aumenta a segurança nas estradas e permite o controlo do estado e fluidez do trânsito em pontos críticos. Este controlo pode ser local, através de sensores colocados nas estradas, ou global, dentro das viaturas, formando assim uma rede;
- Saúde - monitorização do estado de saúde de um paciente ou animal, utilizando por vezes medidas intrusivas mas confortáveis;
- Localização de objectos - localização de objectos ou de pessoas numa área;
- Domótica e electrónica de consumo - controlo do ambiente no interior das casas, controlo de luzes, controlo da segurança e até mesmo controlo de crianças.

A aplicação do sensor influencia a sua arquitectura. Há utilizações em que a longevidade da bateria é o parâmetro de maior importância, como no caso da monitorização ambiental ou na saúde, e outras em que a resolução dos sensores ou a velocidade de transferência dos dados é o aspecto fundamental, por exemplo a segurança em edifícios ou o controle de tráfego.

Outro factor variável com a aplicação é o número de sensores nos nós da rede.

Estas são as razões que levam vários grupos de investigação a especializarem em determinadas áreas, criando produtos que respondam às necessidades das diferentes solicitações.

2.6- Alguns grupos de investigação e seus produtos

O interesse de empresas no desenvolvimento de redes de sensores como a Intel (18), ou Texas Instruments (19) revela que esta tecnologia recente merece investimento, pois tem uma grande margem de desenvolvimento. No entanto, ainda é nos centros de investigação que a maior parte da pesquisa é feita.

De seguida são apresentados alguns trabalhos de investigação bem como os seus produtos:

Na área do ambiente, uma das aplicações em pesquisa chama-se EcoNet (20) e foi desenvolvida na University of Alberta, no Canadá. Neste projecto são criadas unidades remotas equipadas com sensores de temperatura, de humidade e de luminosidade, que comunicam com uma estação base, e disponibiliza os dados na Internet posteriormente. As medidas são intervaladas no tempo, e enviadas directamente para a estação base. Os módulos têm memória para o caso de falhas nas comunicações e as baterias têm autonomia para aproximadamente um ano.

Na área da saúde, existem diversos projectos em desenvolvimento e alguns já concretizados. Os projectos como o ITALH (*Information Technology For Assisted Living at Home*) (21), ou o AlarmNet (22) que estão a ser desenvolvidos para prestar assistência médica à distância, ou seja, na própria casa do paciente. Este sistema efectua diferentes medições disponibilizadas ao médico assistente e permite o controlo do estado de saúde do seu doente, diminuindo os custos do serviço de saúde e a inconveniência de visitas frequentes ao hospital. Este sistema, é importante no acompanhamento de doentes com doenças congénitas, como diabetes e epilepsia, melhorando a qualidade de vida destes pacientes com a utilização de uma medicina preventiva.

Estes módulos são ainda usados em ensaios clínicos, tanto para médicos como farmacêuticos, biólogos e outros investigadores.

Na área do desporto, aplicam-se os sensores no estudo do controlo e da monitorização do movimento dos atletas. São usados módulos de sensores sem fios capazes de detectar acelerações e forças rotacionais, permitindo, uma observação mais precisa do que a conseguida com os velhos métodos baseados nas câmaras de filmar. Os atletas podem, assim, observar, estudar e corrigir os seus movimentos, aumentando o rendimento e reduzindo o risco de lesões. Esta aplicação foi desenvolvida pelo grupo “sportSemble” (23), um grupo do MIT.

As redes de sensores também podem ser usadas na detecção de objectos. Existe um grupo do MIT, que desenvolveu um sistema de sensores, CargoNet (24), capaz de localizar e monitorizar contentores, assim como objectos no seu interior. Para isso, utiliza acelerómetros e microfones que detectam movimentos ou grandes ruídos, respectivamente. Estas perturbações despertam as estações móveis que assim recolhem dados diversificados. Esta aplicação otimiza o uso da bateria que por isso tem um tempo de funcionamento bastante longo e consegue uma boa utilização da memória.

No que respeita à segurança, foram desenvolvidos sistemas que detectam antecipadamente tsunamis, usando acelerómetros no fundo do oceano, que comunicam com estações transmissoras à superfície da água. Estes sensores alertam as populações em tempo útil, possibilitando a sua evacuação e a consequente diminuição do número de vítimas (25).

Relativamente à segurança de populações existe um sistema capaz de detectar a quantidade de água num bloco de neve, projecto SWE (26), desenvolvido pela University of Vermont. As estações estão colocadas em pontos críticos e comunicam através de uma rede de sensores. Com esta tecnologia é possível detectar antecipadamente avalanches e permite o planeamento e o controlo ambiental, assim como compreender as mudanças ambientais.

Nas áreas de investigação como a hidrologia, a geotermia, a ecologia, a meteorologia e a agronomia, existem sistemas de redes de sensores wireless, que determinam grandezas como a temperatura e a humidade relativa do solo, entre outras. Um destes projectos foi desenvolvido na Universidade de Alabama, e utiliza sensores MEMS para determinar as grandezas já referidas. Os nós da rede estão colocados no terreno, estando os sensores enterrados e o módulo de processamento de comunicações à superfície (27).

Na monitorização do ambiente marinho, foi desenvolvido pelo Swedish Institute of Computer Science, um projecto baseado em técnicas de bóias sensorizadas que foram colocadas no mar Báltico. Estas estão ligadas através de um cabo de rede, com os sensores submersos e comunicam entre si através de uma rede sem fios. As estações estão também equipadas com um modem GPRS. Quando uma rede GPRS é detectada envia os dados para o servidor. Neste projecto foram utilizados microcontroladores da família MSP430 (28).

Na Dinamarca, foi desenvolvido um sistema para o controlo do pasto de animais. Este projecto determina a posição dos animais, e possibilita o estudo do comportamento do grupo e a detecção de possíveis animais com problemas de saúde. Ao mesmo tempo, analisa a qualidade do pastoreio e a necessidade de abrir novas zonas de pastoreio (29).

Capítulo 3

Hardware

Neste capítulo é feita uma descrição pormenorizada dos componentes utilizados para o projecto, justificando a razão da sua escolha. São ainda descritas as características e comparadas com outros produtos semelhantes. É, também, apresentado um estudo efectuado relativamente ao consumo energético e à gestão de memória do sistema.

3.1- Microcontrolador

Um dos requisitos do projecto é obter consumos energéticos baixos. Para isso, efectuou-se uma pesquisa no mercado em busca de microcontroladores que satisfizessem o mencionado requisito. Realizada a comparação das várias hipóteses existentes, optou-se por equipar as estações móveis com o microcontrolador da família MSP430 (fig.7), mais precisamente o MSP430F449 (30; 31), da Texas Instruments.



Figura 7 - MSP430 (32)

Este microcontrolador é utilizado em aplicações de medição, tanto em medicina como em aparelhos portáteis de medição ou unidades sensoras.

O MSP430F449 apresenta as seguintes características:

- Memória flash interna de 60kbytes;
- Conversor analógico digital com 8 portas de entrada de sinal analógico;
- Duas portas série e uma SPI;
- Arquitectura Von Neuman, em que cada instrução gasta de 1 a 4 bytes, e a sua execução dura 1 a 6 ciclos de relógio;
- Consumo energético reduzido de 0,1 μA quando desligado, 0,8 μA em modo standby e um gasto de 250 μA por cada instrução realizada;
- Baixa corrente de fuga dos pinos, inferior a 50 nA;
- Possibilidade de se escolher o modo de funcionamento, diminuindo o consumo energético do sistema. Os diferentes modos de funcionamento prendem-se com o número de periféricos que estão ligados ao microcontrolador. No modo de funcionamento com menor consumo de energia, este só responde a interrupções, estando inclusive a unidade de processamento desactivada (32);
- Rápida transição entre o modo standby e o modo normal, o que contribui para uma diminuição dos custos energia, sem que o microcontrolador perca capacidades;
- Vários periféricos, tais como conversores analógico digitais e digital analógico, comunicação via porta série ou SPI, entre outros... Assim, a programação do sistema fica facilitada, diminuindo o número de componentes das unidades móveis e possibilitando a diminuição tanto do tamanho como do consumo energético total da unidade;
- Sistema inteligente de controlo de periféricos, desactivando-os quando não estão a ser utilizados;
- Sistema de supervisão e monitorização da sua alimentação (BOR), com um gasto energético nulo. O BOR reinicia o microcontrolador em caso da tensão de alimentação ultrapassar o limite máximo e mínimo da alimentação (32);
- Conversor analógico digital com uma velocidade de amostragem superior a 200 mil amostragens por segundo, o que possibilita efectuar medidas de vários modos (determinar um valor de uma única porta, de várias portas, ou determinar uma repetição de valores de uma porta ou de várias portas) e a opção de escolha da tensão de referência do conversor quer seja externa ou interna (com valor igual a 1,5V, ou 2,5V).

O projecto utiliza um sistema de desenvolvimento, o modelo MSP430-449STK2, produzida pela Olimex (33). Esta ferramenta permite uma exploração mais rápida das capacidades do microcontrolador, pois possibilita a utilização de todos os periféricos que o equipam, assim como o teste e aperfeiçoamento do programa que vai controlar as unidades móveis. Através deste sistema, utilizando um dispositivo de Flash Emulation Tool, FET (34), é

possível programar o microcontrolador e efectuar “debug” em tempo real do programa instalado. Este dispositivo, é ligado à porta USB de um computador e ao microcontrolador através de uma interface JTAG.

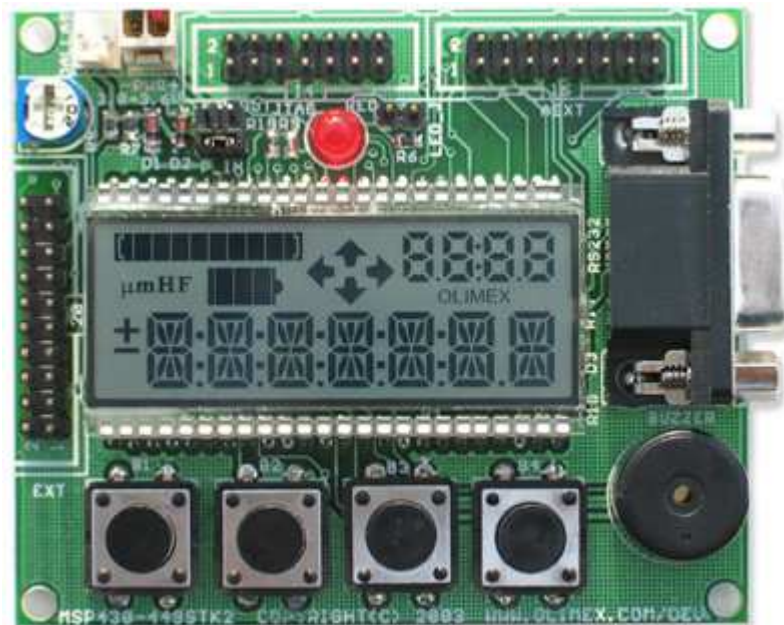


Figura 8 - Imagem da placa de desenvolvimento do MSP430F449 (33)

Para desenvolver o código de programação utilizou-se o programa “IAR Embedded Workbench for MSP430”, produzido pela IAR Systems (35). Que permite editar, programar e fazer “debug” ao código do programa.

3.2- Outros Componentes

Para a escolha dos componentes do módulo de sensores teve-se em consideração os seguintes factores, dada a sua importância para o desempenho global do sistema:

- Consumo energético;
- Custo;
- Sensibilidade;
- Dimensão e peso.

Foram escolhidos os seguintes sensores:

- Aceleração;
- Temperatura e humidade relativa;
- Luminosidade.

3.2.1- Acelerómetro

O acelerómetro escolhido foi o ADXL330, (36), produzido pela Analog Devices, com as seguintes características:

- Realiza a aquisição da aceleração em 3 eixos;
- Apresenta baixo consumo energético;
- Apresenta uma aceleração máxima de 3g.

A saída do sensor é em tensão, sendo esta linearmente dependente do valor da aceleração. Dado a forma como varia a aceleração, o intervalo [-3g a 3g], corresponde em tensão ao intervalo [0V a 3V].

3.2.1.1- Modo funcionamento

A célula sensora é baseada numa estrutura mecânica, formada por materiais semicondutores, que utiliza as características físicas e eléctricas para determinar a aceleração a que está sujeito. A célula sensora pode ser descrita como um circuito constituído por 2 condutores fixos, ligados a uma massa comum que se move entre estes quando lhe é aplicada uma aceleração.

Quando a massa central se move, aproxima-se de um dos eléctrodos fixos e afasta-se a mesma distância do outro. Esta alteração da distância possibilita a medida da aceleração (figura 9).

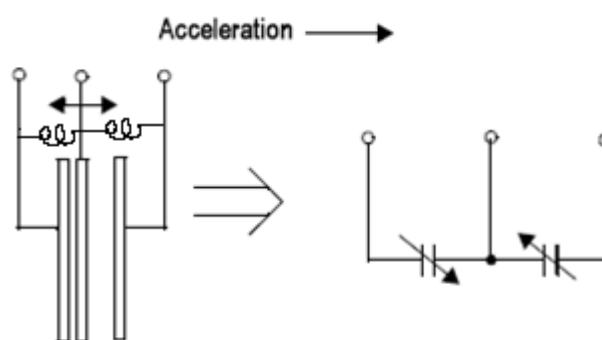


Figura 9 - Funcionamento interno de um acelerómetro

O sistema de medida tem por base 2 condensadores, dos quais a massa varia as capacidades, C , ao sofrer uma aceleração de acordo com a seguinte expressão:

$$C = \frac{A\epsilon}{D} \quad (3.1)$$

A- área do eléctrodo;

ϵ - constante dieléctrica,

D- distância entre eléctrodos.

3.2.1.2. Circuito do acelerómetro

Na ligação do circuito colocou-se um condensador:

- Entre os pinos de alimentação de forma a filtrar o ruído e “ripple” da fonte de alimentação.
- Nas saídas de cada sensor formando um filtro passa-baixo que delimita a banda de frequência do sinal, reduzindo o ruído.

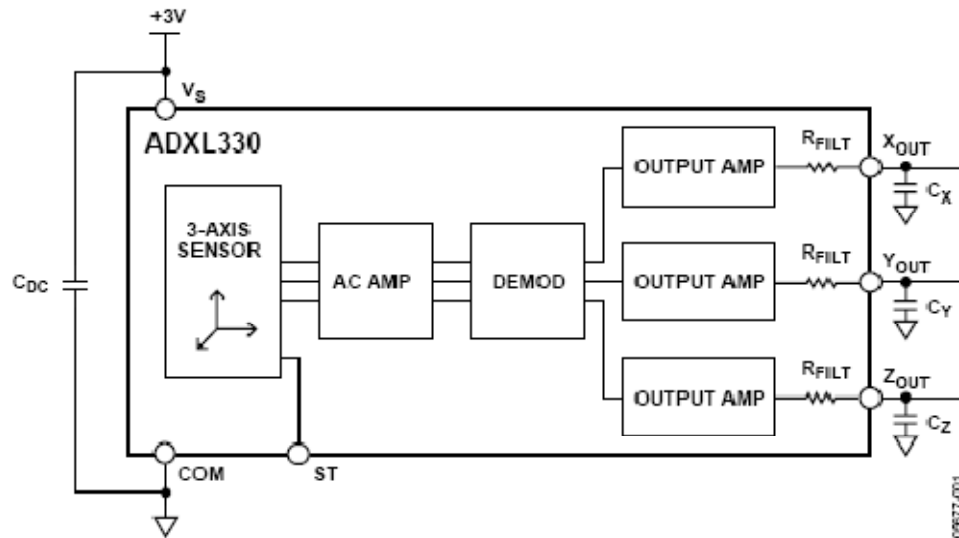


Figura 10 - Diagrama de blocos do acelerómetro (36)

3.2.1.3- Determinação da aceleração

O conversor analógico-digital tem a resolução de 12 bit, e a gama de medida do sensor varia entre -3g até 3g. A tensão à saída do sensor varia entre 0 e 3 Volt. Então, o valor do quantum, q, é:

$$q = \frac{V_{in}}{2^n} = \frac{3}{2^{12}} = 0,73mV/div \quad (3.2)$$

O quantum é o intervalo mínimo entre valores que o microcontrolador consegue detectar.

Entre os 0 e os 3 volt, os valores da aceleração variam entre -3g e +3g. Quando o valor de saída do sensor é de 1,5 volt, então a aceleração é nula. Isto significa que a diferença mínima entre medidas é de 1,46mg/bit

Para determinar o valor da aceleração,

$$a = (\text{valor ADC} - 2048) * 1,46 (mg) \quad (3.3)$$

3.2.2- Sensor humidade/ temperatura

O componente escolhido foi o SHT71, (37), fabricado pela Sensirion com as seguintes características:

- Sensor de temperatura e de humidade;
- Saída digital, com 14 bits para a temperatura, e 12 bits (11 bits efectivos) para a humidade;
- Protocolo de comunicação próprio;
- Margem de erro de 3% na humidade;
- Margem de erro de 0,4% na temperatura;
- Resolução 0,03% na medição de humidade, e 0,01° nas medições de temperatura
- Consumo de energia bastante reduzido;
- Modo de poupança de energia automático.

3.2.2.1- Modo de funcionamento

O sensor de temperatura é do tipo “bandgap” e utiliza o princípio da junção bipolar, base/emissor, de um transistor (BJT). A tensão da junção varia com a temperatura, de acordo com a equação seguinte:

$$v_{BE} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_c}{I_s}\right) \quad (3.4)$$

Este tipo de sensores é muito utilizado em circuitos integrados devido às suas dimensões e à sua facilidade de instalação no circuito. Nestes sensores, a temperatura é medida através da transferência de calor, o que implica o contacto com o elemento sobre o qual se quer determinar a temperatura. No caso da estação móvel, esta está em contacto com a placa do circuito impresso. Se esta não estiver à temperatura ambiente, a temperatura medida vem afectada por um erro. Para o minimizar, tem que se aumentar a capacidade de dissipação de calor da placa ou isolar termicamente o local onde se encontra o sensor (37).

O sensor de humidade é um sensor capacitivo cujo material dieléctrico é um polímero. Este absorve ou liberta água proporcionalmente à humidade relativa do ambiente em que está inserido. A alteração da quantidade de água no dieléctrico altera o valor da capacidade, que depois é determinada por um circuito analógico.

Os sensores de humidade e de temperatura estão colocados na mesma unidade, melhorando assim a qualidade da medida. A transmissão para o controlador é feita via

digital através de uma comunicação série cujo protocolo foi desenvolvido pela Sensirion.
(37)

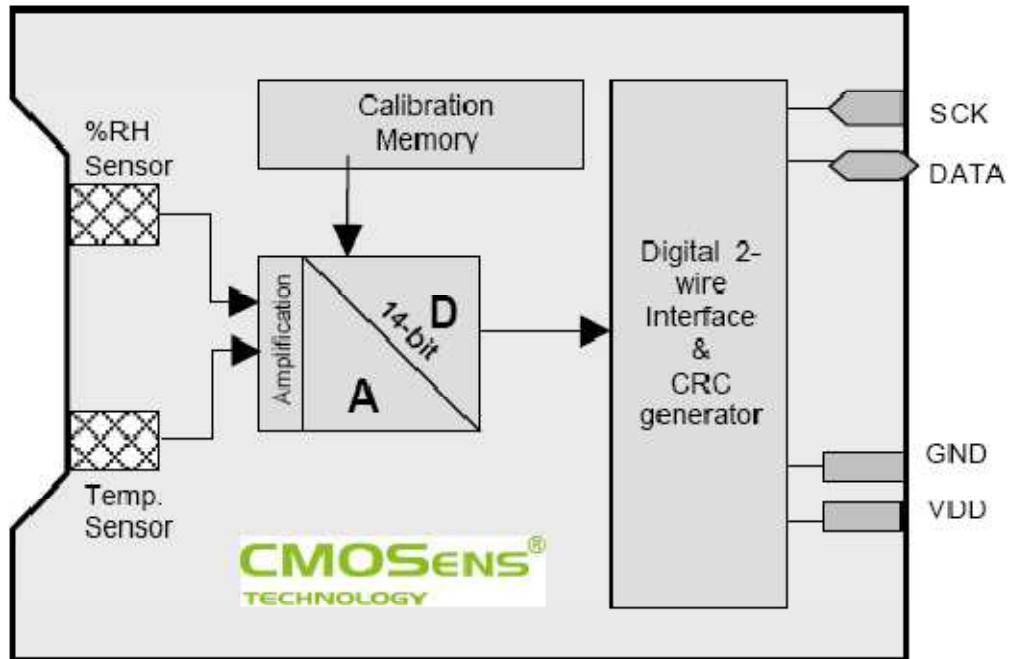


Figura 11 - Diagrama de blocos do sensor SHT71 (37)

3.2.2.2- Determinação da temperatura/humidade

A determinação do valor da Humidade Relativa e da Temperatura, assim como a compensação dos efeitos da não linearidade dos sensores, são obtidas através das expressões:

Para a humidade de relativa (RH):

$$RH = -4 + 0.0405 \times SO_{RH} - 2.8 \times 10^{-6} \times SO_{RH}^2 \quad (3. 5)$$

Para determinar a temperatura (T) deve-se usar a seguinte equação:

$$T = -39.60 + 0,01 \times SO_T \quad (3. 6)$$

O valor da humidade que é enviado pelo sensor está representado por SO_{RH} , o valor da temperatura é SO_T .

Estas equações estão referenciadas na datasheet (37) do sensor.

3.2.3- Luminosidade

O sensor de luminosidade escolhido foi o sensor digital TSL2561 (38), produzido pela TAOS, que comunica através do protocolo I2C.

3.2.3.1- Modo funcionamento

O sensor detecta a luz do ambiente em que está inserido e é equipado com dois fotodíodos. Um dos fotodíodos é sensível a luz visível e infravermelhos e o outro apenas detecta infravermelhos.

As saídas dos fotodíodos é em corrente que é convertida em valores digitais com o apoio de um ADC. Os dois valores adquiridos pelos fotodíodos são utilizados em comparação com as curvas de resposta do olho humano na avaliação da luminosidade.

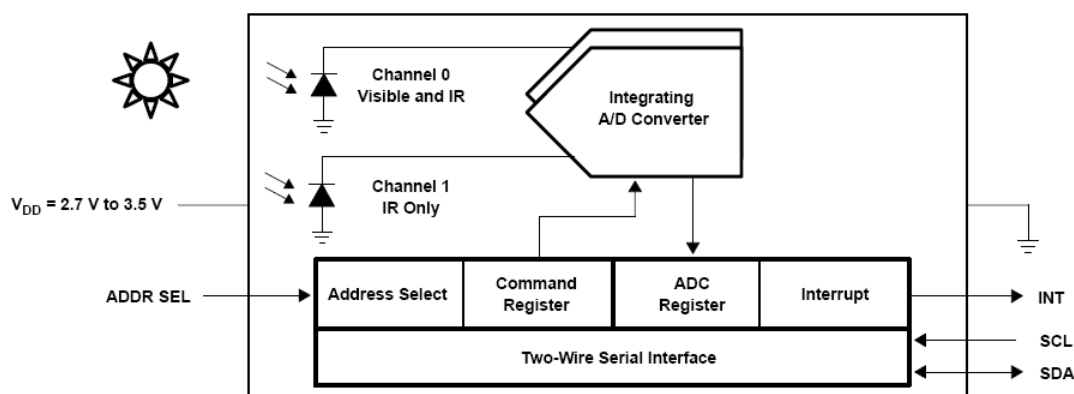


Figura 12 - Diagrama de blocos do sensor de luminosidade (38)

3.2.3.2- Determinação da luminosidade

De acordo com o fabricante a luminosidade é obtida através das equações apresentadas na tabela 1:

Se:	
$0 < \frac{CH1}{CH0} \leq 0,52$	$Lux = 0,0315 \times CH0 - 0,0593 \times CH0 \times \frac{CH1^{1,4}}{CH0}$
$0,52 < \frac{CH1}{CH0} \leq 0,65$	$Lux = 0,0229 \times CH0 - 0,0291 \times CH1$
$0,65 < \frac{CH1}{CH0} \leq 0,80$	$Lux = 0,0157 \times CH0 - 0,0180 \times CH1$
$0,80 < \frac{CH1}{CH0} \leq 1,30$	$Lux = 0,00338 \times CH0 - 0,00260 \times CH1$
$\frac{CH1}{CH0} > 1,30$	$Lux = 0$

Tabela 2 - Determinação do valor da luminosidade

3.2.4- Medição da corrente de consumo

Na medição da corrente de consumo global do circuito utiliza-se o integrado INA138 (39), produzido pela Burr-Brown.

3.2.4.1- Modo de funcionamento

Para determinar a corrente de alimentação utiliza-se uma resistência. Sabendo a queda de tensão nesta, consegue-se determinar qual a corrente que alimenta o sistema. Com o INA138, é possível converter esta queda de tensão, num valor proporcional de corrente, que depois é novamente convertido em tensão com a ajuda de uma resistência, tal como mostra a figura 13.

A medição da corrente de alimentação i_s tem por base a queda de tensão provocada na resistência R_s pela corrente. Tendo em conta a realimentação negativa do amplificador, a queda de tensão $V_a - V_b \approx 0$, logo:

$$I_1 = \frac{R_s I_s}{5k\Omega} \quad (3.7)$$

Considerando que a impedância de entrada do circuito seguinte é muito elevada, a corrente I_1 passa em R_2 assim,

$$V_o = \frac{I_s R_s R_l}{5k} \quad (3.8)$$

Para determinar o valor da resistência de prova, R_s , é necessário ter em consideração, que quanto mais alto ela for maior será a precisão. No entanto, maiores serão as perdas na linha de alimentação. Logo, deve-se chegar a um compromisso entre os dois factores mencionados ao determinar o valor desta resistência.

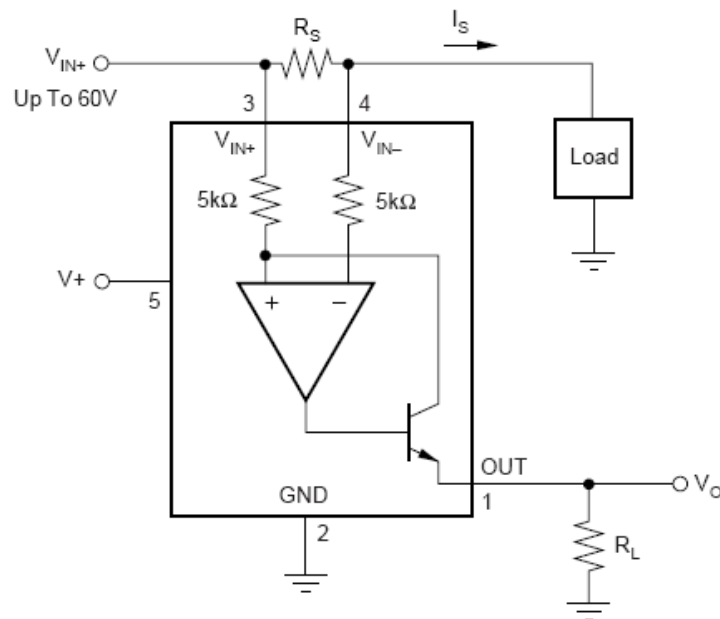


Figura 13 - circuito para a medição da corrente de alimentação (39)

Após a consulta da datasheet deste componente, foi determinado o valor de R_L , 5K Ω , que equivale a um ganho de 1.

Para a determinação do valor de R_S foi tido em conta que a corrente máxima que queremos medir é 50mA, e a tensão máxima de saída vai ser 3Volt. Sendo assim, R_S é de 7,5 Ω .

3.2.5- Comunicações Rádio Frequência

3.2.5.1- Descrição

A comunicação entre a estação base e a estação móvel é feita através de Radiofrequência (RF). Numa comunicação RF, os sinais enviados são electromagnéticos originados nos postos emissores (antenas) e difundidos num meio (ar). A antena do receptor, ao captar um sinal electromagnético, converte-o num sinal eléctrico.

Esta tecnologia foi a escolhida pois apresenta várias vantagens, comparativamente com outras tecnologias de comunicação sem fios. A radiofrequência permite a comunicação entre duas estações, mesmo havendo barreiras físicas entre elas. Permite também a emissão omnidireccional dos dados e em situações de baixo custo, tem um alcance razoável (em campo aberto aproximadamente 300 metros). No entanto, a gama de frequências que podem ser utilizadas na comunicação RF, varia de país para país. É necessário, ter atenção ao local onde o módulo vai ser aplicado, pois existem problemas legais, ao usar frequências não autorizadas (fig.14).

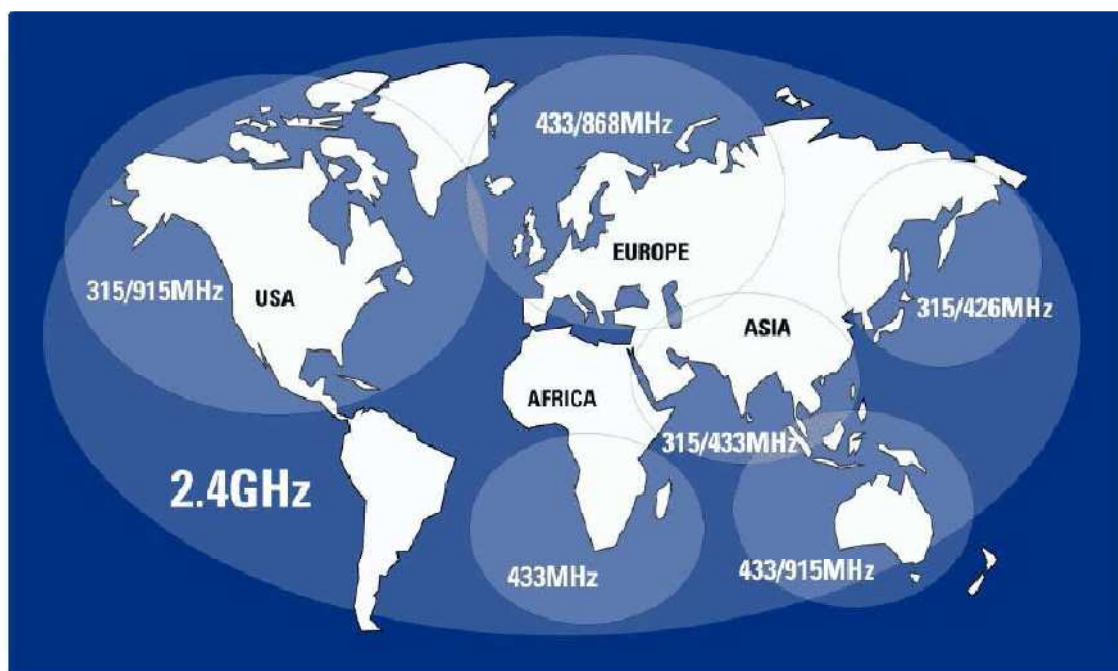


Figura 14 - Frequências legais em cada continente (32)

A utilização da radiofrequência tem inconvenientes. Como o meio de comunicação utilizado na comunicação entre vários módulos é o mesmo, surgem conflitos durante o funcionamento, podendo ser resolvido com um eficiente sistema de controlo de acesso ao meio. Outras desvantagens podem ser enumeradas: o tamanho das antenas necessário para uma comunicação eficiente e a indução de ruído no sinal por vários elementos, diminuindo assim o alcance do sinal (12).

Existem vários protocolos de comunicação definidos para a transmissão de dados wireless. Os mais utilizados são Wi-Fi (norma IEEE 802.11), a Bluetooth e a Zigbee. No entanto, todos eles apresentam inconvenientes. Os dois primeiros não foram desenvolvidos com o objectivo de minimizar o consumo energético da comunicação, mas sim de maximizar a velocidade. São, por isso, mais direccionados a redes de grande débito de informação e têm um custo elevado. Já a rede Zigbee, foi desenvolvida a pensar em comunicações entre microcontroladores. Tem um consumo mais reduzido, mas tem o inconveniente necessitar de uma licença de utilização e de ter um alcance curto (3; 12).

Neste projecto foi decidida a elaboração de um protocolo próprio, que permita futuras evoluções do sistema tendo em vista a sua mobilidade. O novo protocolo foi definido pelo programador, tendo em conta a optimização de consumo durante a transmissão, a detecção de erros e o controlo do acesso ao meio de transmissão.

A opção por um protocolo proprietário também se deve ao facto de todos os protocolos standards não serem destinados a sensores móveis e à possibilidade de se desenvolver um sistema próprio de comunicação orientado à mobilidade dos seus nós.

Tanto na estação base como na estação móvel é necessária a recepção e a emissão de dados, logo os componentes escolhidos terão de ter esta capacidade.

3.2.5.2- Escolha do componente

O emissor/receptor RF seleccionado foi o ERx00TRS-02 (40) que apresenta as seguintes características:

- Alimentação 5V (min 2,5V);
- Corrente consumida:
 - Transmissão: 25mA;
 - Recepção: 21 mA;
 - Sleep: 120 μ A.
- Input/output pins 0-3,3V;
- Frequência de emissão:
 - 834 MHz(9 canais disponíveis);
 - 869,85 MHz;
 - 915 MHz.
- Impedância da antena 50 Ω ;
- Sensibilidade -102dBm;
- Potência da onda emitida controlada pelo utilizador de 0,0625mW a 3,1 mW;
- Comunicação com microcontrolador via porta série;
- Received Signal Strength Indication - Informação da intensidade do sinal recebido.

Um dos principais factores que contribuiu para a escolha do emissor/receptor, foi o facto deste ter disponível a informação sobre a intensidade do sinal, que permite desenvolver técnicas para a localização da unidade móvel. O sinal, analógico, varia entre 0 Volt (sinal com potência máxima, -65dBm) e 1 Volt (sinal com potência mínima, -115dBm), correspondente a uma amplitude de sinal 50dB/Volt.

A figura 15 representa os componentes de teste utilizado para melhor compreender e testar o seu funcionamento.



Figura 15 - Circuitos de teste ERx00TRS-02

3.2.6- Alimentação

As unidades móveis são alimentadas com baterias de 5 Volt para permitir futuras expansões, apesar dos módulos actuais que constituem o sistema serem todos alimentados a 3,3 volts. Por isso, existirá um regulador de tensão que converte a tensão de alimentação para 3,3 Volt.

Assim, o regulador de tensão escolhido foi a o LM3940 (41).

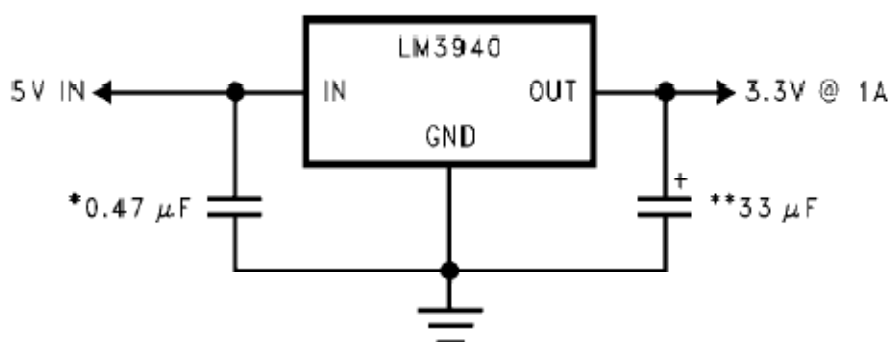


Figura 16 - Circuito de acoplamento do regulador de tensão LM3940 (41)

3.3- Estudos efectuados

Pretende-se que esta unidade móvel seja a mais autónoma possível, que se possa libertar num local específico e não necessitar de manutenção. Os principais factores que limitam o período total de funcionamento da unidade são o espaço disponível em memória e os recursos energéticos. Então, para aumentar a longevidade destas unidades, deve-se otimizar os factores que condicionam o seu funcionamento.

Devido à importância que estes factores têm no desempenho final das unidades móveis, fez-se um estudo que compara os consumos energéticos e os gastos de memória para

cada opção encontrada no mercado, para assim ser feita uma escolha mais acertada. Na tabela 2, mostra-se os recursos de memória necessários para gravar os valores lidos pelos sensores, para posterior avaliação da memória total necessária.

	<i>Número de amostras/dia</i>	<i>Tipo sensor</i>	<i>Espaço em memória</i>	<i>Número de dados por leitura</i>
Humidade	200	Digital (12 bit)	16 bit	1
Temperatura	200	Digital (14 bit)	16 bit	1
Aceleração	400	Analógico (12 bit)	16 bit	3
Luminosidade	200	Digital (16 bit)	16 bit	2

Tabela 3 - Memória necessário para cada sensor

Foram consideradas 200 medidas por dia, o equivalente a uma medida de 7 em 7 minutos aproximadamente. Este valor é considerado aceitável, dado que a velocidade de variação das grandezas humidade, temperatura e luminosidade é pequena. Os sensores de aceleração necessitam de uma taxa de amostragem mais elevada, pois são orientados para medidas dinâmicas.

O sensor de aceleração tem 3 eixos, logo, por cada medição são guardados 3 valores. No sensor de luminosidade é apenas necessário guardar 2 valores por cada medição.

Por cada valor guardado deve-se referir a indicação temporal da leitura. Esta indicação será feita por um byte, que guarda a diferença entre a hora da leitura anterior e a actual. Se a unidade móvel estiver a fazer medidas durante 7 dias ininterruptamente, com a frequência indicada anteriormente, a memória consumida por cada sensor é o mostrado no gráfico 1:

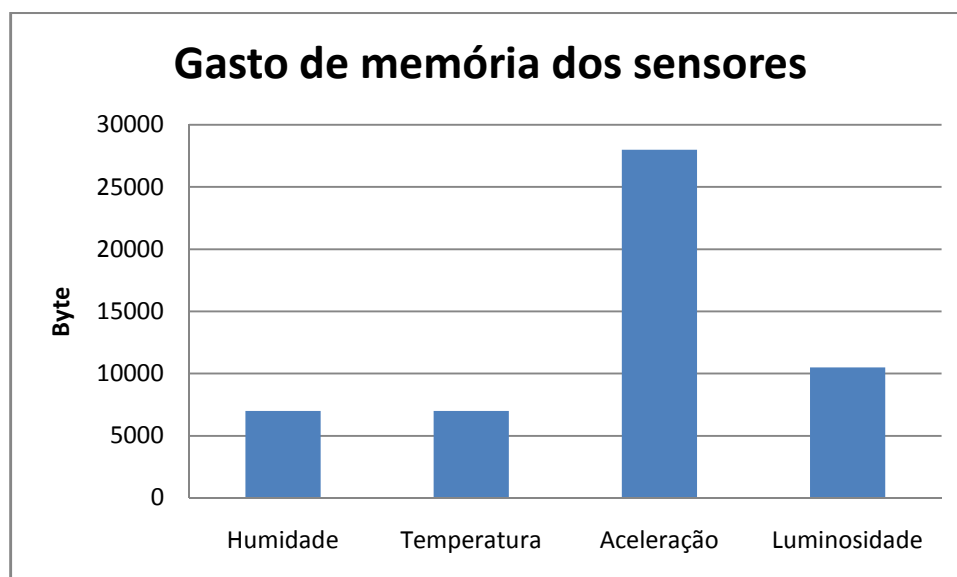


Gráfico 1 - Comparação da memória ocupada por cada sensor

Como podemos observar no gráfico 1, o gasto total de memória é 52500 bytes. Sabendo que a memória disponível para guardar estes dados é de 60kbytes, ainda ficamos com uma margem de segurança considerável.

Diminuindo o número de amostras por dia de cada sensor pode-se ainda aumentar o tempo de funcionamento do sistema.

Foi também efectuado um estudo ao consumo energético total do sistema. No Gráfico 2 está ilustrado o consumo energético de cada sensor:

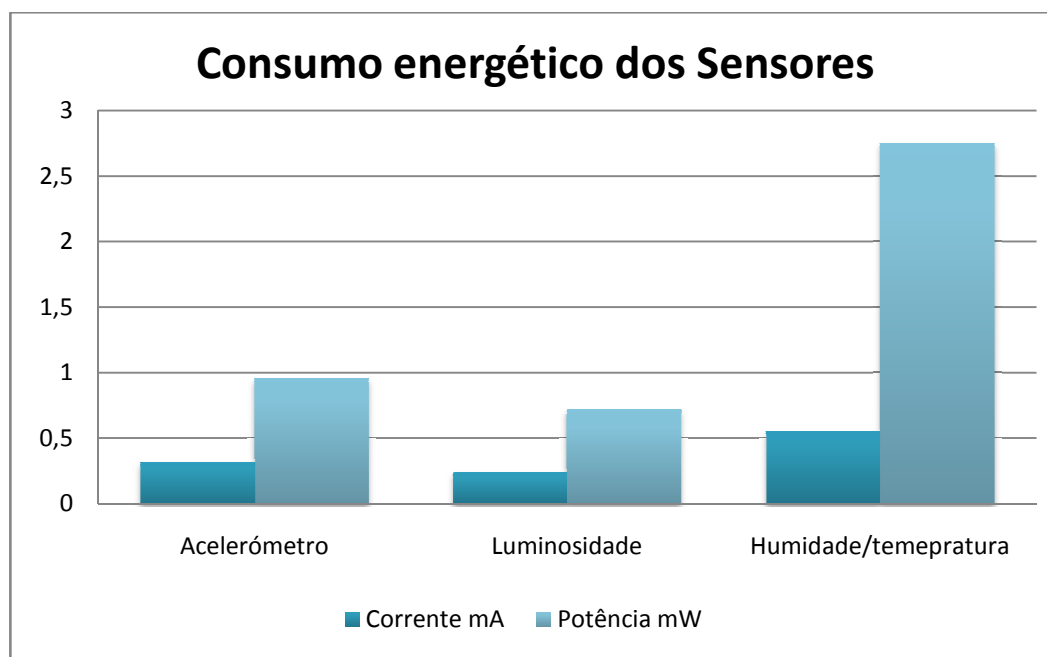


Gráfico 2 - Corrente e potência consumida por cada sensor

Na tabela seguinte é apresentada uma hipótese de funcionamento de uma unidade móvel, utilizada para determinar o seu consumo energético total. O tempo de funcionamento é de 200 horas.

	Tempo funcionamento em horas		
	Emissão	Recepção	Inactivo
Emissor/receptor RF	20	20	160
Humidade/Temperatura	Em medição	Inactivo	
	10	190	
Luminosidade	Activo	Inactivo	
	10	190	
Acelerómetro	Activo	Inactivo	
	80	120	
Microcontrolador	Activo	Inactivo	
	130	70	

Tabela 4 - Tempo de funcionamento dos sensores

No Gráfico 3 são apresentados os consumos do conjunto de sensores, da unidade de rádio frequência e do microcontrolador.

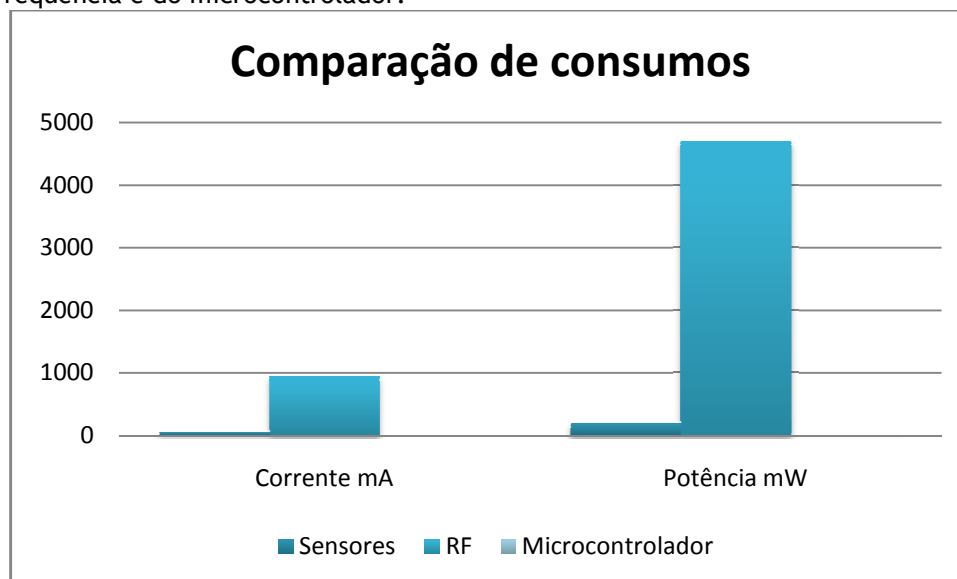


Gráfico 3 - Comparação dos consumos dos vários sistemas

O consumo total do sistema é 5,71mA/h, 27,67mW/h. É de notar que a unidade que consome mais energia é a unidade de rádio frequência, logo o funcionamento desta deve ser optimizado. No cálculo da energia consumida foi considerado que todos os outros sistemas que não estão aqui enumerados, como o LM3940 ou o INA138, consomem uma percentagem do valor calculado com estes componentes.

Os valores determinados para o consumo total de energia são apenas indicativos, sendo sempre possível aumentar a longevidade de funcionamento das unidades, reduzindo a frequência de aquisição de dados por exemplo, como já referido anteriormente.

3.4- Arquitectura

Após definir os componentes que equipam as unidades, decidiu-se o modo como eles seriam instalados.

Optou-se pela utilização da memória interna do microcontrolador, já que segundo os testes efectuados, esta não prejudica o funcionamento global do sistema. No entanto, como o microcontrolador vem equipado com uma porta SPI, é possível aumentar a capacidade de armazenamento de dados, tanto com memórias flash normais como com cartões de memória.

Dependendo do modo como os sensores disponibilizam a sua informação, analógica ou digital, estes ligam-se ou ao conversor analógico/digital ou a portas digitais do microcontrolador.

Os módulos emissores/receptores de rádio-frequência comunicam usando a porta série, tanto na unidade móvel como na unidade central.

Para a unidade central, desenvolveu-se uma aplicação que responde aos comandos do utilizador, e é responsável pela comunicação entre as estações.

Os dados recolhidos pela unidade móvel são guardados em bruto, juntamente com uma referência temporal do instante da aquisição. Todo o processamento necessário para a obtenção dos valores das grandezas medidas é efectuado na unidade central, pois assim o processamento das unidades móveis é menor, diminuindo o consumo de energia.

Na figura 17 está representado o fluxo da informação entre os constituintes de todo o sistema.

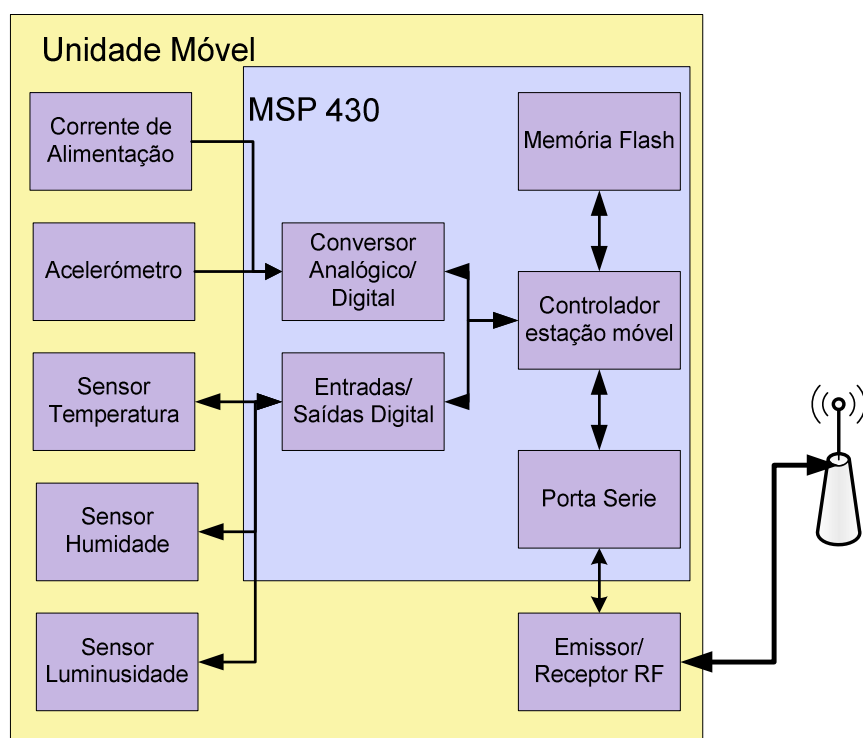


Figura 17 - Fluxo de informação dos componentes da unidade móvel

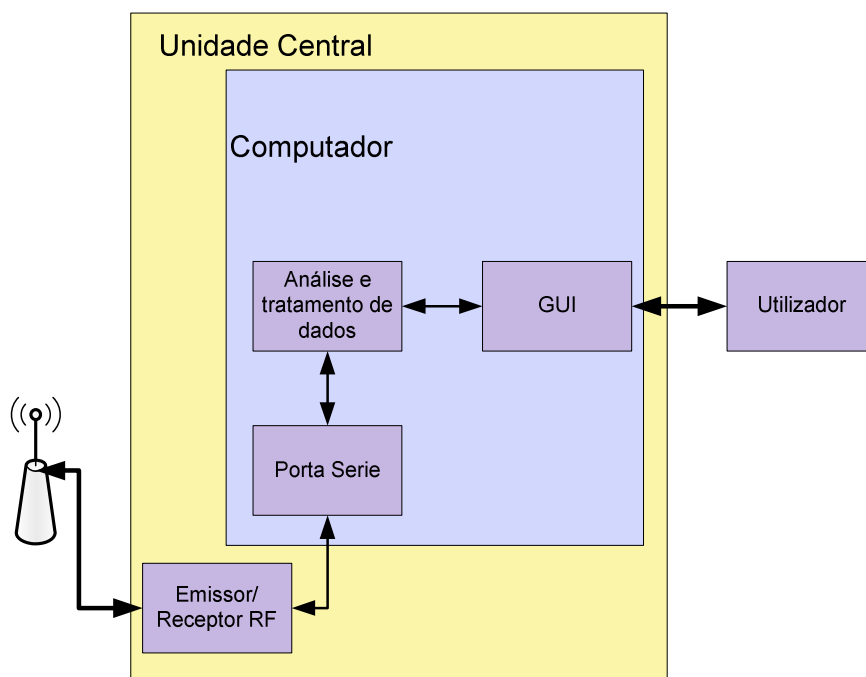


Figura 18 - Fluxo de informação dos componentes da unidade fixa

A arquitectura da rede Wireless tem uma topologia em estrela. No centro está a unidade central, que será sempre uma das participantes na conversação.

As unidades móveis nunca podem comunicar entre si. Somente em acontecimentos excepcionais, como por exemplo, durante a ocorrência de um alarme, estas podem iniciar uma conversação. Em todas as outras situações, as estações móveis só respondem a pedidos da estação base. Quando a unidade central deseja receber informação de alguma unidade móvel, envia uma trama com o endereço da estação de destino, assim como o comando pedido.

A frequência utilizada nestas comunicações é de 868MHz, que corresponde à frequência de funcionamento na zona europeia. No entanto o integrado responsável pelas comunicações pode ser programado para funcionar nas frequências das outras zonas.

3.5- Placas de circuito impresso

Para o circuito impresso, foi utilizado o software OrCad, de projecto, de desenvolvimento e de edição de circuitos eléctricos e electrónicos, desenvolvido pela empresa Cadence.

Para elaborar o PCB de um circuito começou-se pelo desenho esquemático deste, utilizando para isso o programa OrCade Capture Cis. Este software, além de definir as ligações entre os componentes do circuito, necessita da definição do “footprint” a ser impresso por cada elemento do circuito.

Depois de concluído o esquemático do circuito com todos os componentes definidos, é necessário desenhar o circuito impresso da placa. Para isso utilizou-se o software Layout Plus,

onde se escolhe a posição dos componentes, a largura e a rota das pistas, entre outras opções.

Durante o projecto desenvolveram-se dois circuitos diferentes.

Um dos circuitos contém os sensores e os conectores adequados para a ligação ao circuito do microcontrolador, e foi utilizado no teste das comunicações entre o microcontrolador e os sensores.

Na imagem 19 é apresentado o esquemático deste circuito, uma vista da placa de circuito impresso, assim como a lista de materiais que se encontra no anexo 1. Nesta placa encontram-se todos os sensores, resistências e condensadores de acoplamento. Para alimentar o circuito utiliza-se uma fonte de alimentação externa de 3,3 Volt. Outra possibilidade é a alimentação através da placa de desenvolvimento.

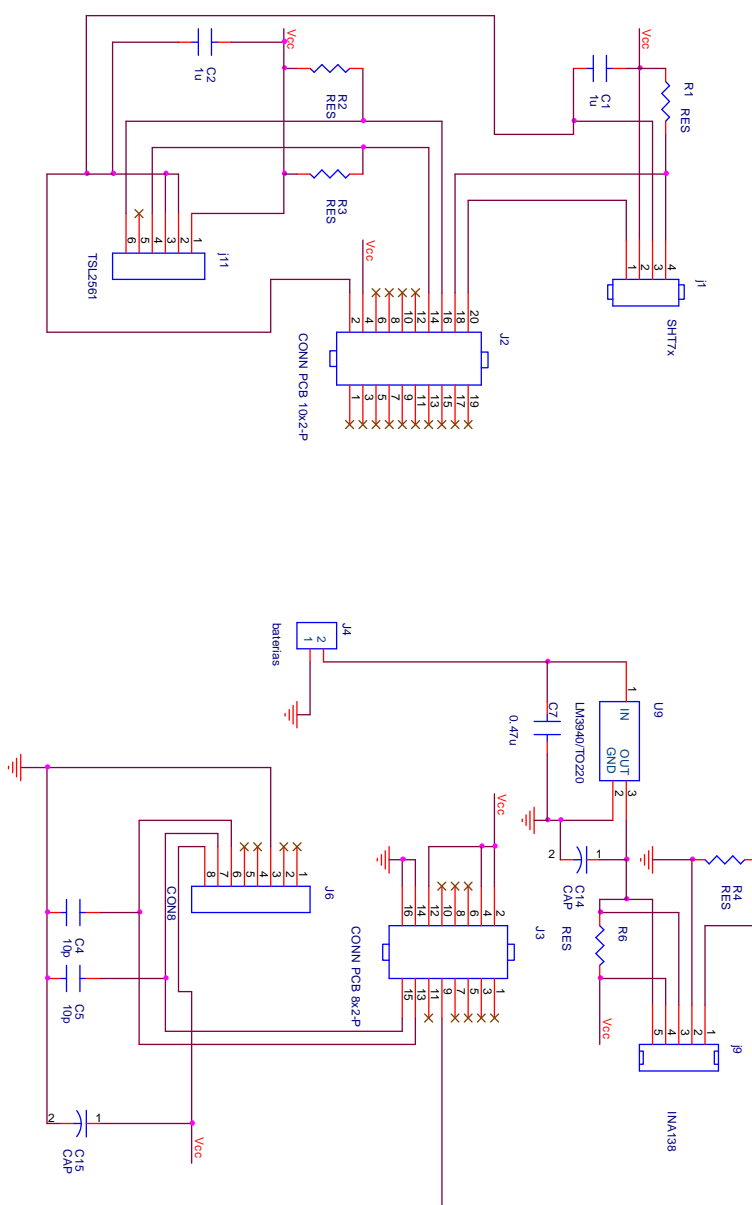


Figura 19 - Circuito de teste dos sensores

O circuito serviu de protótipo ao circuito final das estações móveis.

Nas portas do conector J2, temos os seguintes sinais:

<i>Pino</i>	<i>Função</i>
2	Massa
4	Vcc
14	Barramento dados I2C
16	Barramento relógio I2C
18	Barramento dados SHT71
20	Barramento clock SHT71
Outros	Não tem função

Tabela 5 - Saídas conector J2 da placa protótipo

Já no conector J3, temos os seguintes sinais:

<i>Pino</i>	<i>Função</i>
2 e 4	Vcc
12	Tensão referência do AD
14 e 16	Massa
9	Saída do INA138
13	Eixo y acelerómetro
15	Eixo x acelerómetro
Outros	Não tem função

Tabela 6 - Saídas conector J3 da placa protótipo

Neste circuito utilizou-se um outro acelerómetro, ADXL203 (42), com as mesmas características do escolhido para as estações móveis, por revelar maior facilidade de montagem.

O segundo circuito desenvolvido foi o circuito impresso final. Neste, estão todos os componentes presentes nas estações móveis: microcontroladores, sensores e módulos RF.

Na figura 20 é apresentado o circuito eléctrico de uma unidade móvel.

No anexo 2 pode-se encontrar o circuito impresso do circuito assim como uma lista dos materiais usados.

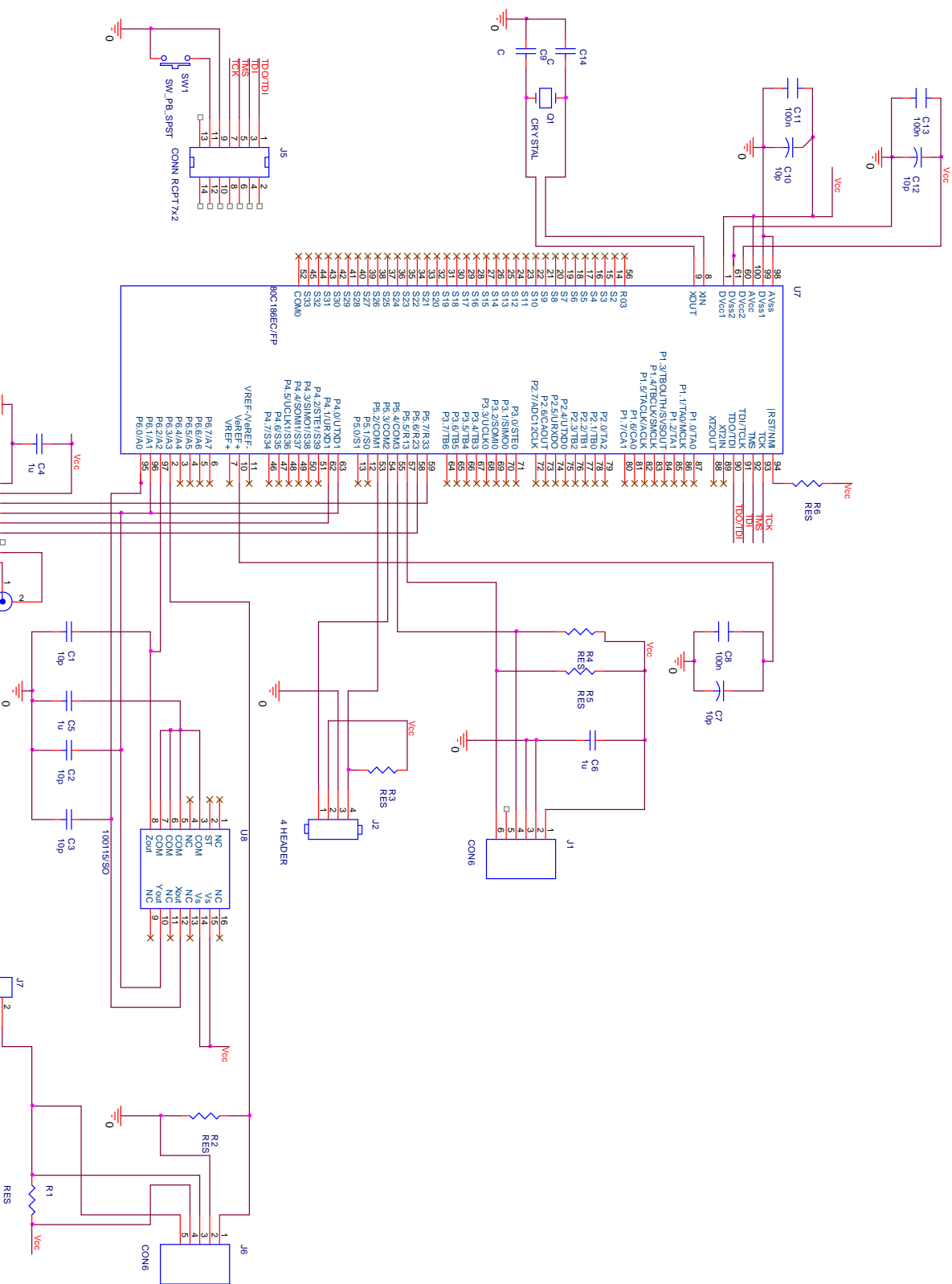


Figura 20 - Circuito das unidades móveis

Capítulo 4

Software

4.1. Programa estações móveis

4.1.1- *Descrição*

O programa instalado no microcontrolador de cada unidade móvel é constituído por vários módulos:

- Um por cada sensor instalado, que é responsável pela comunicação entre o microcontrolador e o sensor;
- Um responsável pelo controlo das comunicações entre as estações;
- Um que controla o funcionamento da unidade móvel responsável por iniciar as leituras dos sensores. Este pode ser configurado pelo utilizador a partir da estação base (número de leituras, frequência de aquisição...).

A vantagem desta arquitectura é permitir a futura expansão do sistema, facilitar a troca do tipo de sensores utilizados e possibilitar uma reprogramação fácil da estação móvel.

A figura 21 ilustra de uma forma simplificada a configuração das estações móveis.

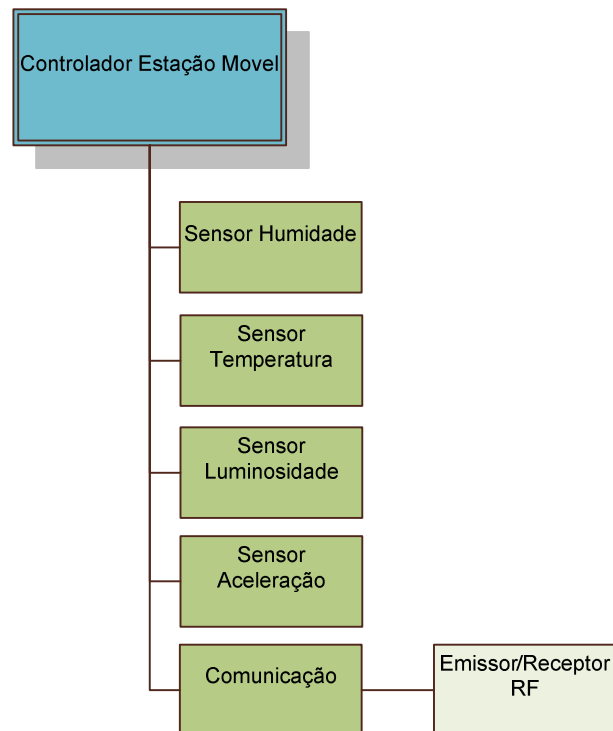


Figura 21 - Controladores estação móvel

O módulo de cada sensor funciona como um “driver” deste, é responsável por adquirir o valor do sensor e por enviá-lo para o controlador da estação. A estação determina o instante da medida e só aceita medidas isoladas, não sendo, por isso, possível realizar medidas simultâneas dos sensores.

No controlador da estação móvel existe uma unidade de comunicação que escuta os dados que estão a ser transmitidos na rede. No caso de receber alguma mensagem que lhe é destinada, responde ao comando enviado.

O sistema permite realizar leituras de dois modos diferentes:

- Ciclicamente é efectuada uma medida em que o intervalo de tempo é definido pelo utilizador;
- Quando o valor de um sensor ultrapassa um determinado limite, configurado pelo utilizador, este passa a ser lido continuamente durante um curto período de tempo.

O modo de utilização dos sensores é inteiramente controlado pelo utilizador.

O microcontrolador usado tem a capacidade de se colocar num estado de baixo consumo, e só volta a efectuar operações após ocorrer uma interrupção. Numa tentativa de

minimizar o consumo do sistema, optou-se por todas as rotinas serem iniciadas por uma interrupção (usando o “timer” e Interrupção da porta série).

4.1.2- *Diagrama de estados*

Tal como foi descrito anteriormente, o programa da estação móvel está dividido em componentes mais elementares. Neste ponto é descrito o modo de funcionamento de cada um deles.

4.1.2.1- *Controlador*

O controlador é o responsável pelo controlo de todo o funcionamento da unidade móvel. No diagrama de estados, figura 31, está apenas apresentado o modo de funcionamento de um sensor genérico. Todos os sensores que equipam a estação móvel têm este ciclo de funcionamento.

No diagrama de estados estão descritos os dois modos de funcionamento dos sensores:

- A medida cíclica, ramo da direita - após o tempo, definido pelo utilizador, ser ultrapassado é feita uma medida;
- Na medida por alarme, descrita no ramo da esquerda - no caso de um valor limite ser ultrapassado inicia-se uma medida contínua da grandeza, durante um intervalo de tempo definido.

Depois de efectuada a medida pelo sensor, é memorizado o tempo que decorreu entre a última medida e a actual, permitindo assim situar no tempo a leitura.

A estação interrompe a execução da tarefa quando recebe um pedido de comunicação e responde chamando a função “comunicação”.

Sempre que o microcontrolador não está a comunicar nem a efectuar medidas encontra-se no modo poupança de energia, permitido pelo MSP430. Durante este modo, o microcontrolador responde apenas às interrupções. Por esse motivo, a programação desta estação está orientada a eventos, ou seja significa que quando ocorre algum acontecimento o sistema reage respondendo a este.

O instante da medida é baseado na interrupção do “timer”. No caso do sensor estar configurado com medida cíclica, sempre que ocorre a interrupção do timer, são decrementadas as variáveis que contêm a informação sobre o tempo que falta, para a próxima medição. Quando uma destas variáveis for nula, é iniciada a determinação do valor da grandeza correspondente, e depois regista-se o valor na memória. No caso do sensor estar

configurado para efectuar medidas por alarme, em todas as interrupções do timer é realizada uma leitura, e os valores são comparados com o valor limite. No caso deste ser ultrapassado, é iniciado um ciclo de medição contínua.

A configuração da interrupção do “timer” depende da frequência do relógio do microcontrolador, 32kHz. Na configuração do tipo de contagem que se deseja, neste caso “Up-mode”, é introduzido o valor máximo a contar, que influencia o tempo entre interrupções. Sempre que é atingido o valor, o contador retoma ao valor 0 e volta a contar até ao valor configurado.

A porta série também gera uma interrupção, sempre que algum dado é recebido, ficando este disponível num registo do sistema.

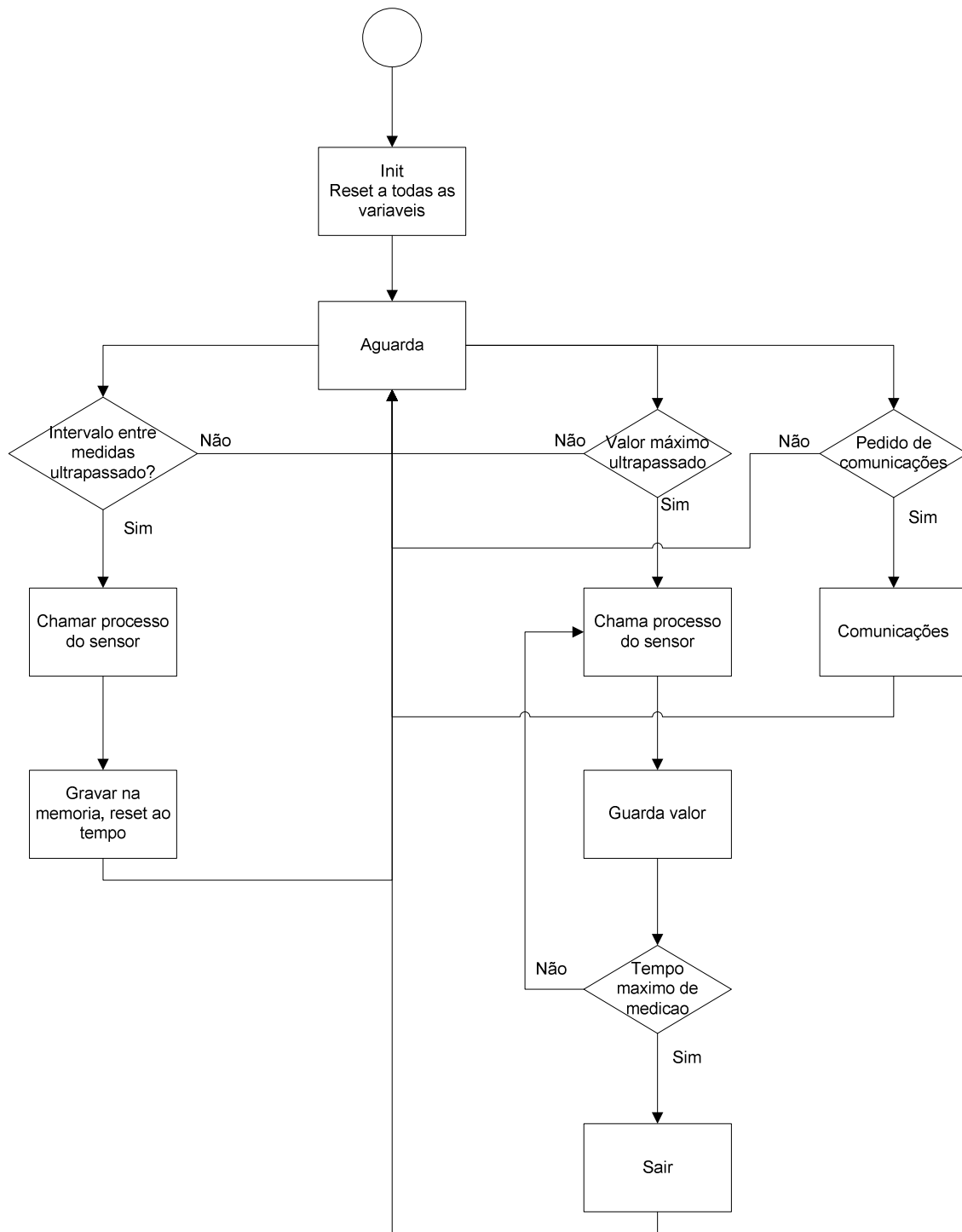


Figura 22 - Diagrama de estados do controlador da estação base

4.1.2.2- Acelerómetro

O sensor de aceleração é um sensor analógico, sendo necessário usar o conversor analógico digital para determinar o valor da aceleração. O microcontrolador, MSP430F449, tem disponível apenas um conversor com 8 portas de entrada analógicas, que podem ter

diferentes configurações. Assim, os 3 eixos deste sensor estão ligados a 3 portas do conversor do microcontrolador, que não permitem realizar simultaneamente as medidas dos 3 eixos do sensor. Para realizar a aquisição utiliza-se a funcionalidade do conversor AD que possibilita a leitura de uma sequência de canais, com um intervalo de tempo que pode ser desprezado.

Após efectuar uma medida o conversor gera uma interrupção, sendo os dados disponibilizados nos registos do conversor AD. Estes valores são então enviados para o controlador da base através de variáveis globais.

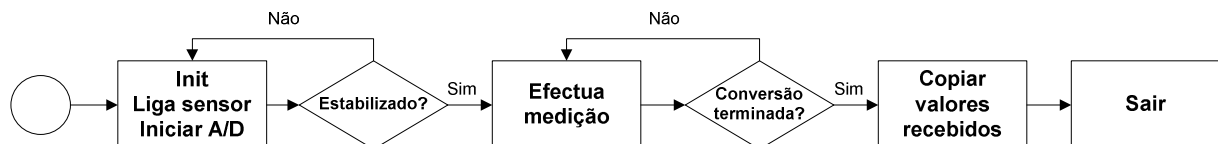


Figura 23 - Diagrama de estados do driver do acelerómetro

O conversor AD do MSP430 tem 12 bit de resolução, é interno ao microcontrolador e utiliza a tecnologia de aproximações sucessivas (Successive-approximation-register, SAR) (43). Esta tecnologia é aplicada em conversões de alta ou média resolução, é a mais usada no mercado e permite uma velocidade de amostragem de 5M amostragens por segundo (o conversor do nosso microcontrolador permite 200k amostragens por segundo). As principais vantagens são ter um baixo consumo energético, um baixo factor de deformação do sinal e estar inserido no microcontrolador.

O modo de funcionamento do conversor, de aproximações sucessivas, implementa um algoritmo de procura binária cuja velocidade de amostragem é uma fracção da frequência do relógio.

No início da aquisição o conversor adquire o sinal que se pretende converter. Depois este sinal é comparado com N tensões, sendo a inicial $V_{ref}/2$, em que V_{ref} é a tensão de referência e N o número de bits. O valor do bit que corresponde á leitura toma valores de 0 ou 1, consoante o sinal amostrado seja maior ou menor do que o valor de referência.

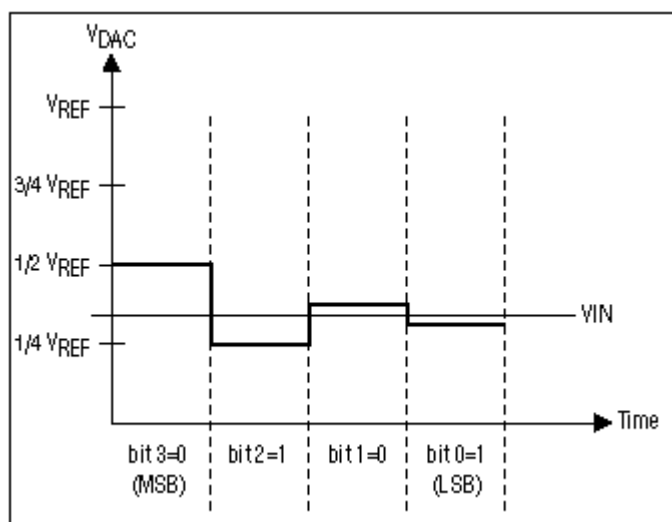


Figura 24 - Método de aproximações sucessivas (43)

As vantagens destas tecnologias são então o baixo consumo, a boa resolução e a baixa distorção. A maior limitação é o tempo de amostragem.

4.1.2.3- Luminosidade

O sensor de luminosidade é digital e utiliza o protocolo I2C para comunicação. O microcontrolador não tem disponível este protocolo de comunicações, por isso desenvolveu-se um módulo de comunicação. A ligação ao microcontrolador é feita através de duas portas entradas/saídas digitais. Para obter o valor determinado pelo sensor é enviado o comando para efectuar a medida, através do barramento de dados. De seguida, o sensor responde pelo mesmo barramento, com o valor da luminosidade.

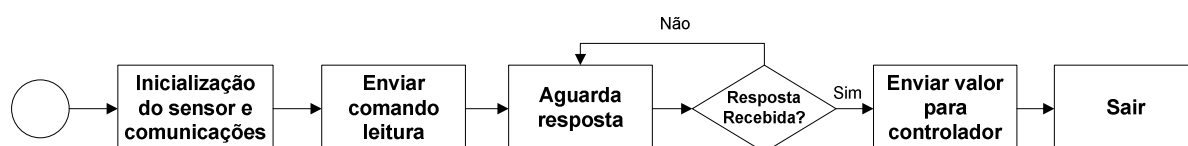


Figura 25 - Diagrama de estados do driver do sensor de luminosidade

O protocolo I2C (44) foi desenvolvido pela Philips há cerca de 20 anos, dada a necessidade de diminuir a complexidade, o custo e o tempo de desenvolvimento das comunicações entre componentes do mesmo circuito. Inicialmente, a velocidade de comunicação máxima permitida era de 100kbps, mais tarde foi aumentada para 400kbps e actualmente já existem componentes que permitem velocidades de comunicação na ordem de 3,4Mbps. Este protocolo já está bastante difundido no mercado e utiliza apenas dois barramentos para conectar os componentes da rede. É utilizado maioritariamente na conexão entre dispositivos inteligentes, como microcontroladores e microprocessadores, mas também em outros circuitos, como drivers LCD, portas de I/O, memórias RAM e EEPROM e conversores de dados.

Os dois sinais usados pelo protocolo I2C são:

- linha de dados (SDA) ;
- linha de relógio (SCL).

Ambos os sinais ligam-se à fonte de alimentação através de uma resistência de “pull-up”. Juntos permitem a transmissão em série de tramas constituídas por 8 bit para os dados, 7 ou 10 bit para o endereço do componente e bits de controlo. O componente que inicia a transmissão é o “Master” e a mensagem é endereçada ao “Slave”.

Este protocolo permite a presença de mais do que um “Master” na rede (multi-master). Cada “Slave” é responsável pela monitorização do barramento e apenas responde ao seu próprio endereço.

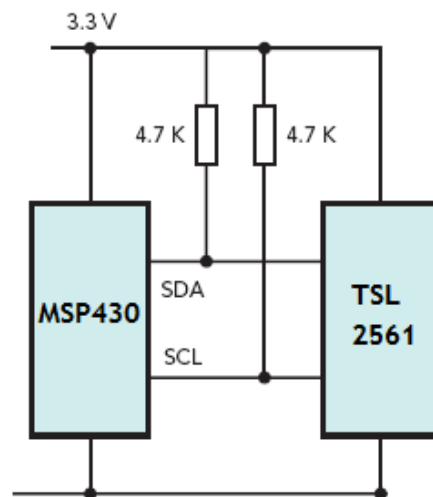


Figura 26 - ligação eléctrica segundo o protocolo I2C

O procedimento da uma comunicação é:

- O master envia condição de início, START;
- O master envia o endereço do dispositivo com quem quer comunicar;
- O oitavo bit indica se o master pretende escrever ou ler no dispositivo slave;
- Condição ACK enviada pelo receptor da mensagem confirma a recepção do byte anterior;
- O emissor (master caso fosse indicado a escrita ou slave caso indicasse que leitura) envia um byte;
- O receptor da mensagem envia a condição ACK a acusar a recepção dos dados;
- Repetição das 2 últimas situações dependendo do número de bytes a enviar;
- O Master envia a condição STOP, para finalizar a comunicação.

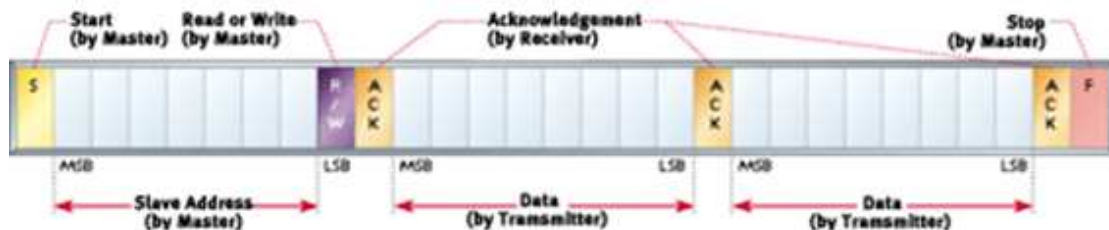


Figura 27 - Informação no barramento de dados do protocolo I2C (44)

Código	Sequência de dados
START	Linha SDA colocada com valor lógico 0, e depois SCL também.
ACK	Depois do oitavo bit ser recebido, o receptor deve colocar o canal SDA com valor lógico "0" durante um impulso do relógio.
STOP	O Master solta a linha SCL e depois SDA.

Tabela 7 - Descrição dos sinais usados no protocolo I2C

4.1.2.4- Humidade/temperatura

O mesmo sensor é usado para medir a humidade e a temperatura. Este sensor é digital e usa um protocolo próprio, desenvolvido pelo fabricante de acordo com as regras por ele pré-definidas. Assim, o sistema recebe os valores da temperatura ou da humidade alterando o comando enviado. Logo que o valor é recebido, utiliza uma variável temporária para o enviar ao controlador do microcontrolador.

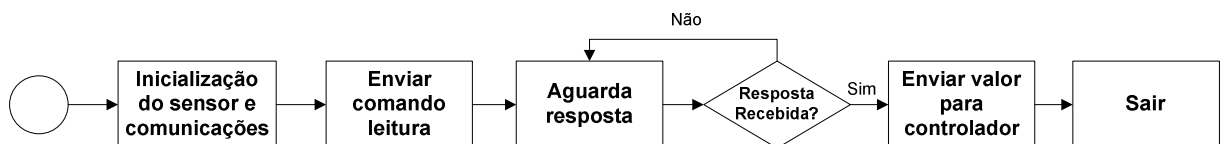


Figura 28 - Diagrama de estados do driver do sensor de luminosidade

A comunicação entre o sensor de humidade/ temperatura e o controlador é uma comunicação série, otimizada para utilização de sensores e para uma diminuição do consumo energético. No entanto, este protocolo não é compatível com outros existentes no mercado, de uso mais generalizado (como o I2C).

Este protocolo utiliza apenas 2 sinais de dados: a linha SCK usado para a sincronização da comunicação; a linha DATA onde a informação é transmitida. Neste último, o valor do bit a enviar deve ser alterado na queda do sinal SCK e lido quando o sinal sobe do nível lógico 0 para 1.

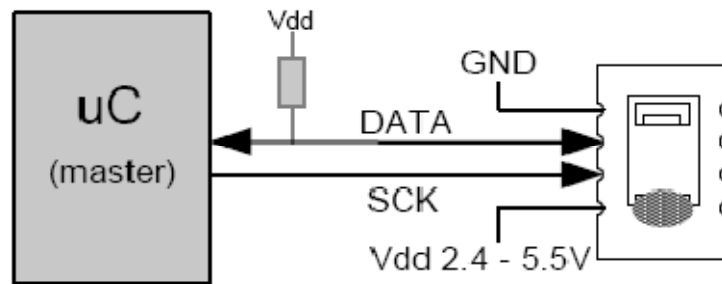


Figura 29 - Ligação física entre o sensor SHT71 e o microcontrolador (37)

O procedimento para a comunicação (ver figura 30) é o seguinte:

- a comunicação tem início quando o microcontrolador envia a sequência inicial de bits, “transmission start”;
- De seguida é enviado o endereço do receptor constituído por 3bits;
- Posteriormente é enviado o comando respectivo à informação que se pretende;
- O receptor da mensagem acusa a recepção, colocando o barramento DATA com nível lógico 0;
- Depois de efectuada a leitura, o sensor sinaliza o envio da informação recolhida colocando o canal DATA com o valor lógico “0”, durante 4 ciclos de relógio;
- Depois envia 2 bytes com os dados lidos;
- O controlador indica que recebeu cada byte, colocando DATA com valor lógico “0”.
- Depois da segunda confirmação, o sensor envia “CRC” para verificar a veracidade dos dados recebidos;
- O controlador finaliza a comunicação com “end transmission”.

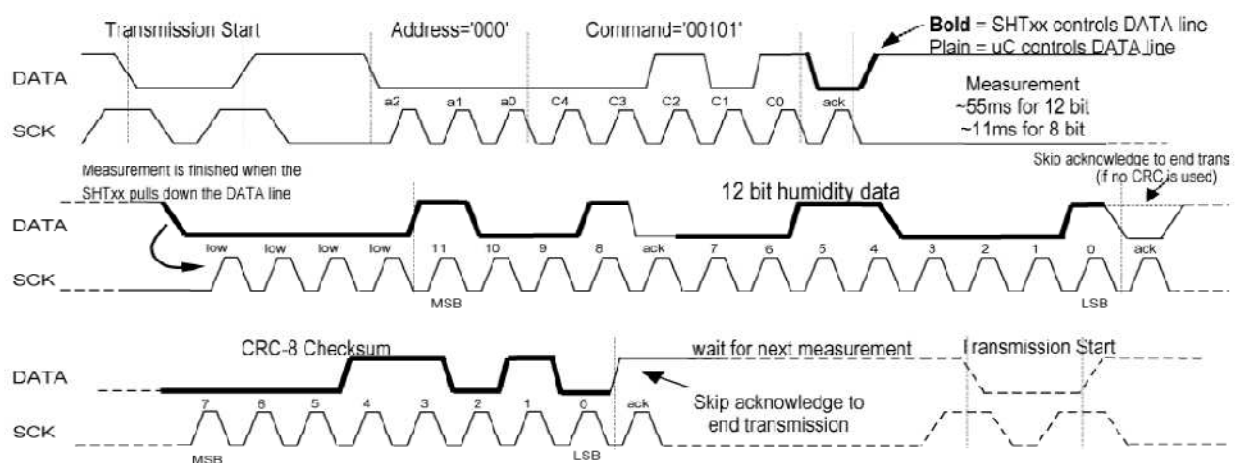


Figura 30 - Descrição do protocolo do sensor de temperatura e humidade (37)

<i>Código</i>	<i>Sequência de dados</i>
“Transmission Start”	Colocar o canal data com valor lógico 0 enquanto SCK está no nível 1, esperar um ciclo de relógio e voltar a elevar o valor de DATA para 1.
Endereço	Enviar “000”
Leitura temperatura	Enviar o comando “00011”
Leitura humidade	Enviar o comando “00101”
“End transmission”	Colocar o canal DATA com valor lógico 1 enquanto o sinal SCK está no nível “0”.

Tabela 8 - Descrição dos sinais usados no protocolo de comunicação com o sensor de temperatura e humidade

4.1.2.5- Recepção de dados pela rede

Os dados recebidos são copiados para uma variável, onde são guardados. Após a recepção total da trama, seguindo as regras já definidas, é dado início à leitura. A identificação inicial do destinatário da mensagem, origina uma das seguintes situações à informação recolhida:

- Entra num estado que aguarda a libertação do meio de transmissão, sinalizado com um “#”, no caso de não ser o destinatário
- Analisa toda a informação da trama, caso a placa seja o destinatário. Neste caso é analisado o resto da informação contida na trama.

Na imagem 31 está representado o comportamento do sistema quando são recebidos os diversos pedidos.

- No caso de receber um “R” é feito reset a memória;
- No caso de “C” são feitas as reconfigurações necessárias;
- No caso de “E” são enviados os dados;
- No caso de “V” é verificado o estado.

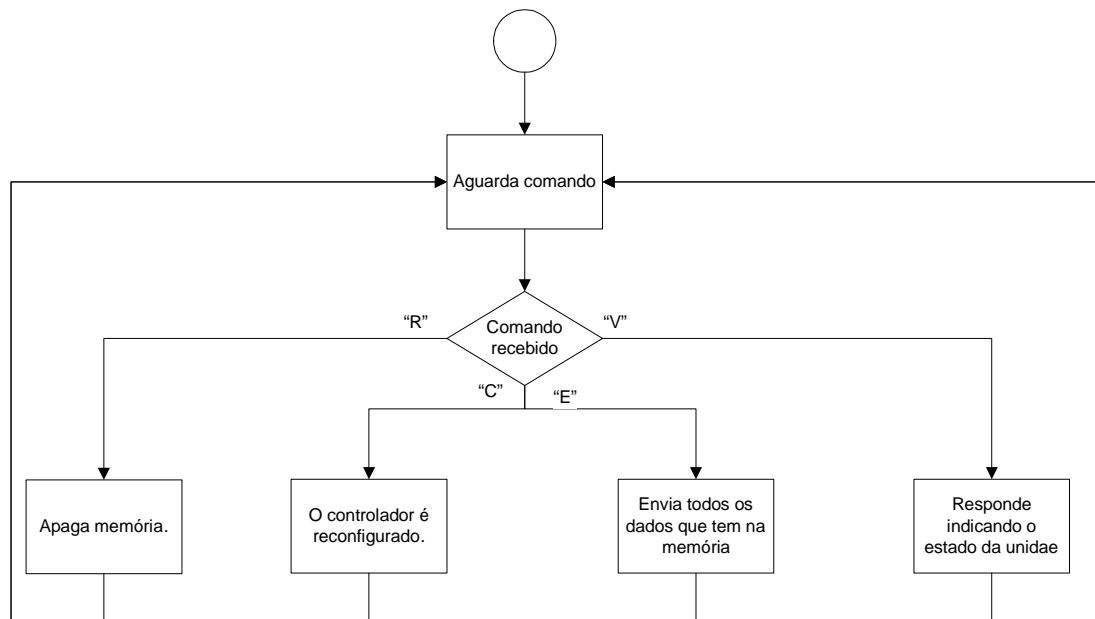


Figura 31 - Diagrama de estados do processo de recepção de dados

Quando o comando recebido é um pedido para efectuar Reset à unidade, todos os dados registados em memória são eliminados.

No caso do pedido recebido ser para indicar o estado da estação, são enviados os dados relativos ao estado da tensão e corrente da alimentação. Estes dois valores são determinados utilizando o conversor analógico digital do microcontrolador.

4.1.2.6- *Enviar dados*

A unidade móvel só permite enviar os dados de um sensor de cada vez. Dependendo do pedido recebido. Esta envia os dados de cada sensor, eliminando de seguida os registos memorizados.

- No caso de receber um “A” envia os dados do acelerómetro;
- No caso de “C” envia os dados do sensor de luminosidade;
- No caso de “D” envia os dados de temperatura;
- No caso de “E” envia os dados da humidade.

A primeira trama enviada após a recepção dos pedidos, apenas contém a informação relativa ao início da aquisição dos dados e ao número de dados a enviar.

Posteriormente, a estação base responde confirmando a recepção dos dados, e inicia a transmissão dos dados em memória, sendo enviados os seguintes em cada trama:

- O tempo desde a ultima medida;
- Os dados relativos a esse instante.

Antes do próximo envio, é necessário aguardar a resposta da estação base. Nesta resposta é apenas enviado o endereço da estação móvel.

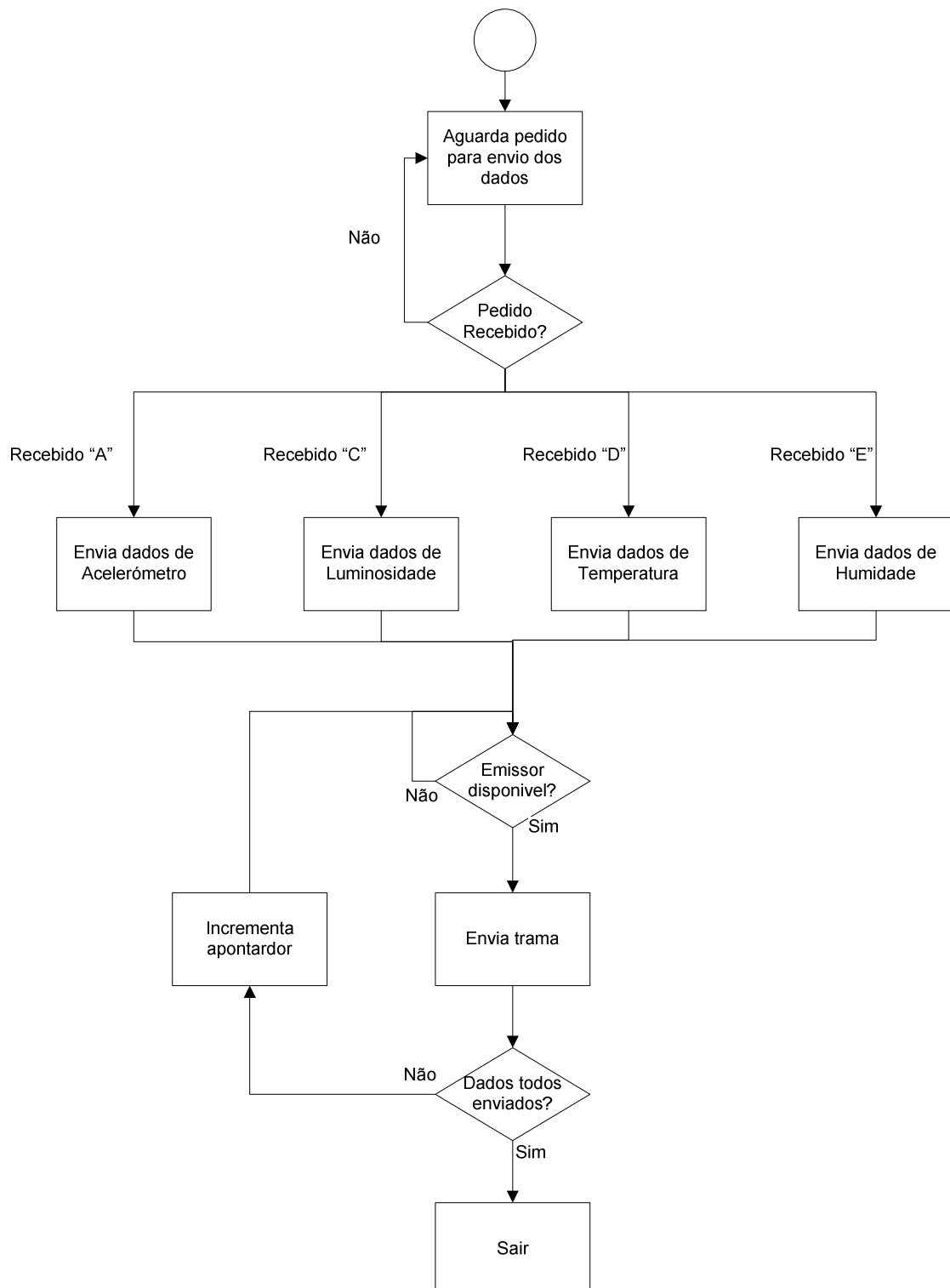


Figura 32 - Diagrama de estados do processo de enviar os dados

4.1.3-Protocolo de comunicação de dados

A estação base é a responsável por gerir toda a comunicação. Quando pretender comunicar com uma estação móvel envia o endereço desta na primeira trama. A esta mensagem apenas a estação assinalada responde. Todas as outras ficam à espera do final da comunicação. Só a partir deste momento é que as estações móveis voltam a comunicar. As outras estações móveis só podem estabelecer contacto com a estação base após o término desta comunicação

A confirmação da recepção dos dados é feita através do envio de uma trama com o endereço da estação móvel.

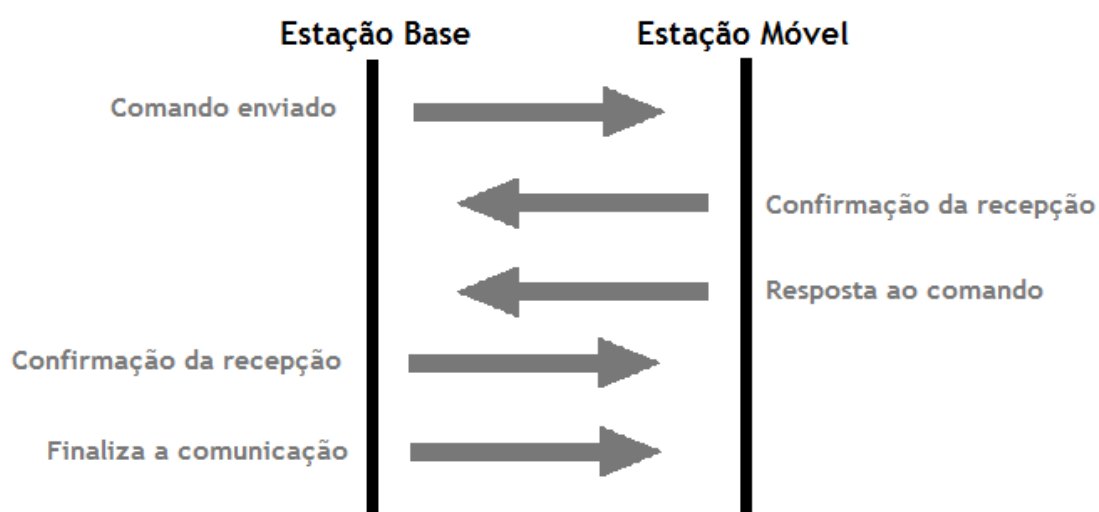


Figura 33 - Diagrama de sequências das comunicações entre uma estação base e uma estação móvel

Se uma estação base envia um pedido de comunicação, para além dos caracteres de início e fim de trama, deve enviar o endereço da estação de destino, o comando que deseja efectuar e, conforme o caso, os dados complementares. Das estações móveis receptoras desta trama, apenas responde aquela à qual a mensagem foi endereçada. Todas as outras devem, aguardar a libertação do meio de transmissão.

No caso de ser pedido o envio de valores guardados em memória, na trama de resposta ao pedido, a estação base deve enviar tanto a data de início de recolha de dados como o número de tramas que vai enviar. Após a trama de recepção da unidade base, inicia o envio dos dados guardados em memória. Estas remessas devem conter o endereço da estação móvel que emite os dados, o tempo decorrido desde a última medida e os dados recolhidos nesse instante.

Quando a estação base detecta o fim da comunicação, envia o carácter a todas as bases a informar o fim desta transmissão.

<i>Símbolo</i>	<i>Significado</i>
#	Início comunicação/trama
<Endereço>	Numeração das bases (decimal)
<Comando>	R - Reset C - Configurações E - Pedido de leituras V - Verificar estado de funcionamento
<Dados>	Aqui são colocados os dados que sejam necessários para a realização do comando
!	Fim da trama
%	Fim da comunicação (apenas enviado pela base)

Tabela 9 - Códigos usado nas comunicações

<i>Comando</i>	<i>Símbolos</i>
Enviar comando	# <Endereço> <Comando> <Dados> !
Confirmação da recepção	# <Endereço> !
Resposta aos comando	# <Endereço> <Dados> !
Fim comunicação	%

Tabela 10 - Formato das tramas

O endereço é o símbolo que identifica a estação na rede e é constituído por um número. A estação base é quem tem o endereço com o número mais baixo, 0.

Em caso de alarme, uma estação móvel só inicia uma comunicação se o meio de transmissão estiver livre. Se, após algum tempo não receber a resposta da estação base é sinal que ocorreu uma colisão entre tramas, logo esta vai esperar para fazer uma nova tentativa de comunicação.

4.1.4- Memória

Para guardar os dados em memória, antes de serem enviados para a estação base, estudaram-se dois tipos de estruturas que se poderiam aplicar nesta situação:

- O buffer circular;
- A memória dinâmica.

Num buffer circular é criado um vector com um tamanho definido e dois apontadores. Um apontador indica o último valor escrito, o outro indica o último valor lido. Para ler a memória deve-se percorrer todas as posições entre o último valor lido e o último valor escrito. Quando um dos apontadores atinge o último valor do vector, salta para o início do vector. Quando o apontador do último valor escrito atinge o apontador do último valor lido, significa que a memória atingiu o seu limite.

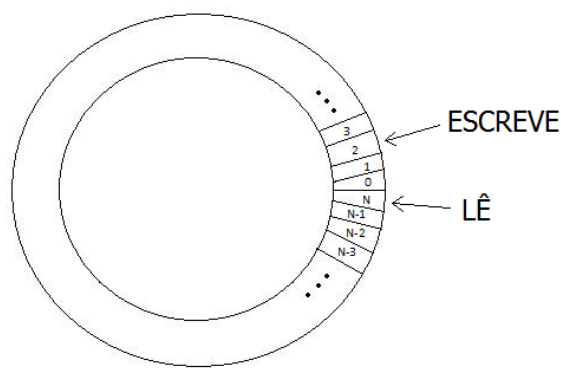


Figura 34 - Estrutura da memória

Na memória dinâmica, o tamanho dos vectores não é definido. Sempre que se pretende escrever, reserva-se um bloco de memória e só depois regista os dados. Estes podem não estar organizados de forma sequencial, mas dispersos por toda a memória. Deste modo, o espaço ocupado pelos apontadores dos locais da memória não é desprezável e atrasa o acesso à memória.

Para uma melhor optimização do espaço em memória foi decidido utilizar uma memória do tipo circular.

4.2. Programação estação base

A estação base é constituída por um computador e um emissor/receptor de radiofrequência. A comunicação com o computador é feita através de porta série, RS-232. Desenvolveu-se uma interface gráfica com o utilizador (GUI) de modo a que a utilização do sistema seja mais intuitiva e automatizada. O programa desenvolvido é orientado ao evento, reagindo quando acontece algum acontecimento na aplicação.

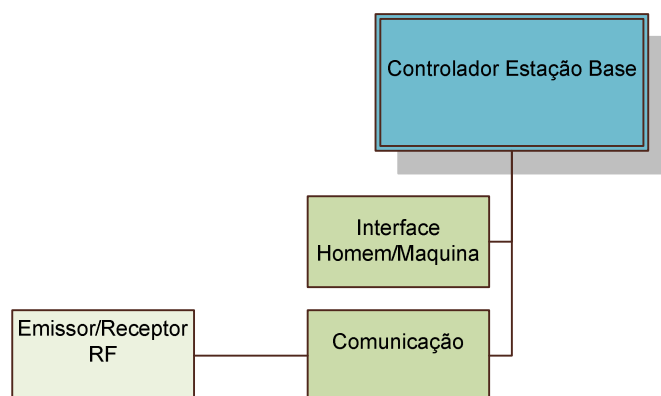


Figura 35 - Constituição da estação base

A aplicação gráfica desenvolvida, tem por base o programa de edição Lazarus (45) e é compatível com sistema operativo Windows ou Linux e promove uma interacção intuitiva com os utilizadores do sistema.

A janela principal tem a forma da figura seguinte:

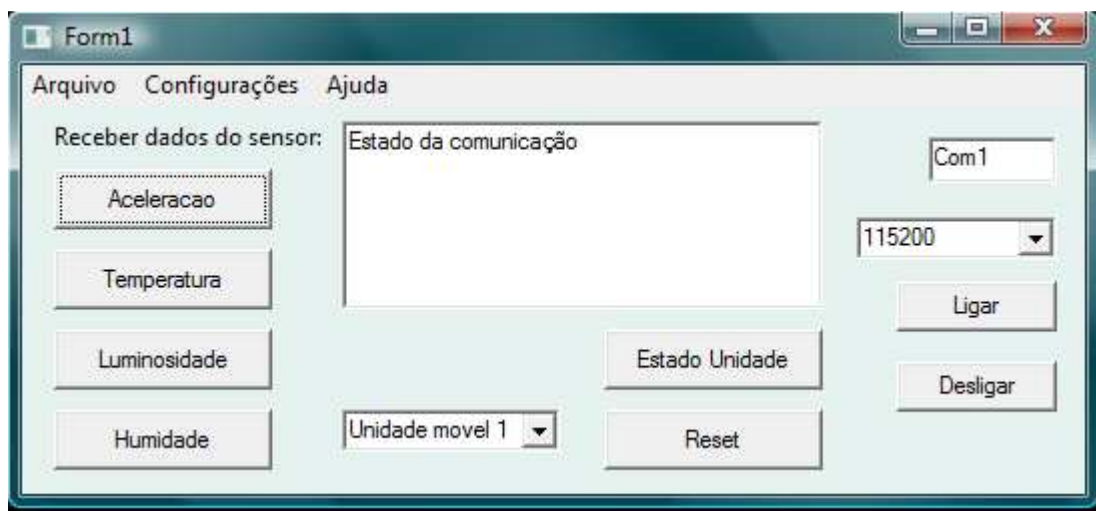


Figura 36 - Janela principal da aplicação da estação base

Nesta interface no lado direito configura-se a comunicação através da porta série, escolhendo a velocidade e a porta a utilizar.

No campo de texto são apresentadas informações sobre o estado da estação base.

Também é possível, pressionando os respectivos botões, fazer um Reset ao sistema e inquirir a unidade sobre o seu estado, sendo dadas informações sobre os valores da tensão e da corrente de funcionamento.

No menu superior, abre-se as janelas de configuração de todos os sensores, figura 39, no campo “Configurações” é permitido ligar/desligar o sensor e alterar o modo de leitura dos valores e a frequência de recolha de dados (valor em minutos).

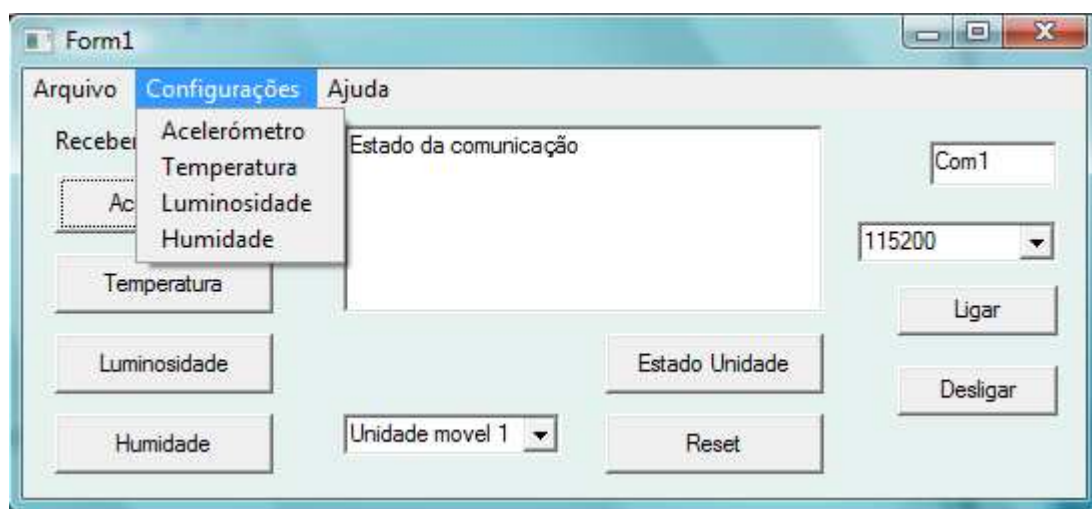


Figura 37 - Menu Configuração

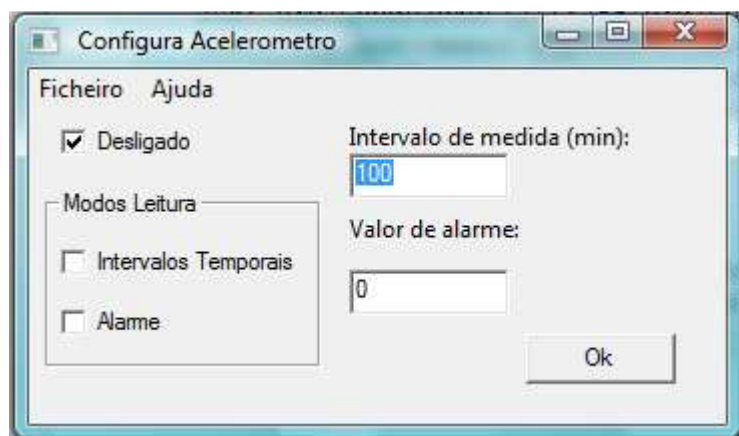


Figura 38 - Janela de Configuração do modo de funcionamento dos sensores

Na janela principal, caso se pressione os botões das diversas grandezas, são enviados os dados armazenados em memória da unidade móvel seleccionada. Assim automaticamente abre a janela de recepção de dados, figura 40, e é apresentado um gráfico com os dados recebidos e um campo de texto para onde os valores serão guardados. Esta janela possibilita o armazenamento dos dados recolhidos num ficheiro, para posterior utilização noutros programas.

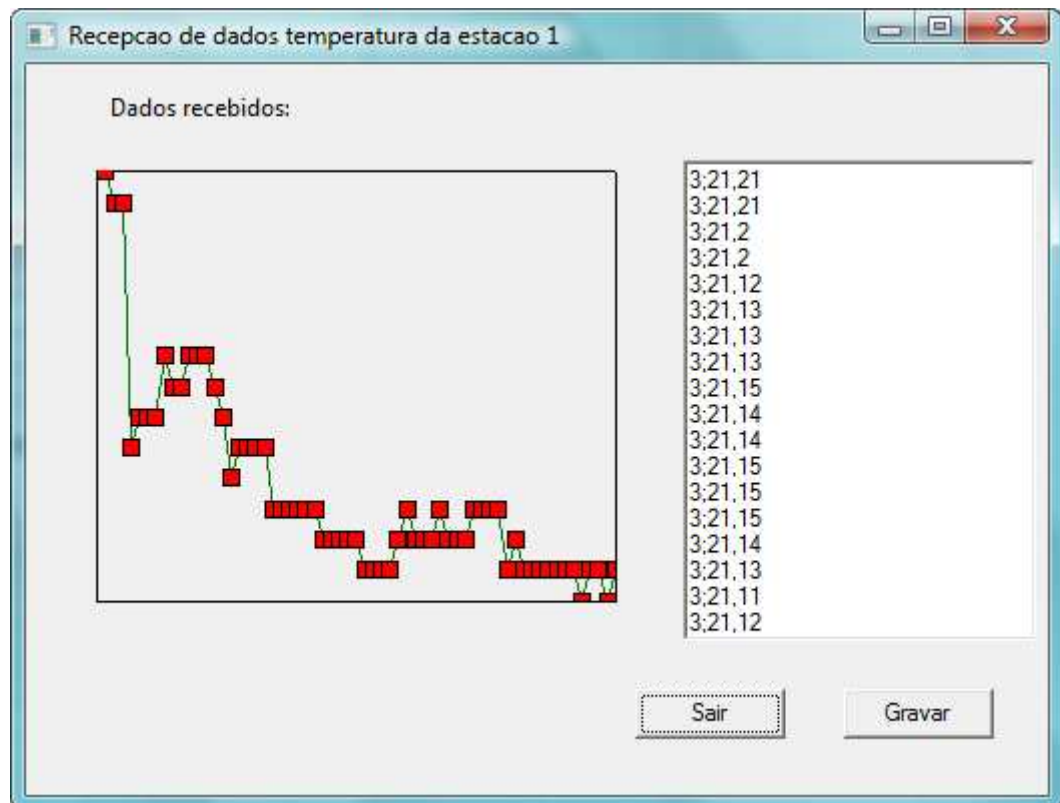


Figura 39 - Janela de apresentação dos dados

O programa apresenta todos os dados ao utilizador e gere as comunicações de todo o sistema.

Após o utilizador introduzir novos dados ou ao efectuar novo pedido, o programa inicia imediatamente a comunicação com a estação base, seguindo as regras definidas anteriormente, na descrição deste protocolo.

4.3. Validação de resultados

O valor da aceleração determinado pelo acelerómetro é uma função da aceleração da gravidade. Então, se um dos eixos do acelerómetro estiver colocado perpendicularmente à superfície da Terra, o valor determinado pelo sensor será o equivalente a $1g$. No caso do acelerómetro estar colocado num plano inclinado, o valor da aceleração medido vai depender do ângulo que este faz com a superfície (fig.41):

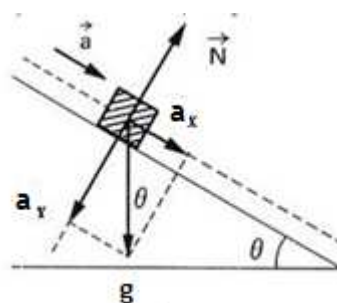


Figura 40 - Plano Inclinado

A aceleração é então igual a

$$a_y = g \cos \theta \quad (5. 1)$$

$$a_x = g \sin \theta \quad (5. 2)$$

Para testar então os valores determinados pelo acelerómetro foi efectuado o teste anterior obtendo-se os seguintes resultados:

Ângulo	Aceleração no eixo y (g)		Aceleração no eixo x (g)	
	Valor esperado	Valor medido	Valor esperado	Valor medido
90	1	0,9813	0	0,0388
45	0,707107	0,6856	0,707107	0,68154
0	0	0,0480	1	0,9824

Tabela 11 - Resultados dos testes obtidos com o acelerómetro

Da tabela apresentada anteriormente conclui-se, como era de esperar, que existe sempre uma diferença entre o valor real e o valor experimental para a aceleração.

A diferença média entre o valor medido e o valor esperado é 0,0283. Este valor, embora um pouco elevado, pode ser justificado pelo facto de aos valores experimentais estarem associados erros aleatórios, que não podem ser controlados pelo operador. Como as medições foram efectuadas numa banca, havendo variáveis que não foram controladas, tais como possíveis vibrações resultantes de movimentos próximos do sensor, as medidas efectuadas pelos sensores poderão se afastar ligeiramente dos valores reais, o que pode explicar a diferença entre os valores apresentados na tabela.

Para a validação dos dados recolhidos com o sensor de temperatura/ humidade e luminosidade, não houve disponibilidade de ter instrumentos de medida com uma precisão maior que os sensores utilizados. Logo não se podem tirar conclusões de valor científico relevante. Apenas argumentar que os dados recolhidos tanto pelos sensores deste projecto como pelos outros instrumentos de medida (menos precisos) são muito próximos, o que leva a aceitar os valores como válidos.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

6.1. Conclusões

Neste trabalho foram desenvolvidas e testadas a estação móvel protótipo, a estação base e o modo de comunicação entre elas.

Inicialmente foram estudados alguns projectos, já desenvolvidos noutros centros de investigação, de modo a recolher informações sobre esta tecnologia, identificar as práticas mais comuns e as suas principais utilizações. Depois de desenvolvida a pesquisa e de uma interiorização de um conhecimento mais sustentado sobre o tema foi possível definir uma estratégia global para a sua concretização. Assim, foi planeada a arquitectura de todo o sistema de modo a que todos objectivos fossem concretizados. Optou-se por uma escolha que tornasse este projecto real, aberto e versátil.

A arquitectura escolhida para a estação base foi a que permite facilmente uma adaptação de novos sensores.

O sistema desenvolvido neste projecto destina-se à monitorização das grandezas físicas temperatura, humidade, luminosidade e aceleração. Assim, os nós desta rede podem ser utilizados em diferentes aplicações como na agricultura e na monitorização do ambiente. No entanto, nestas aplicações pode ser importante a recolha de mais elementos, tais como presença de elementos químicos, pelo que há necessidade de acrescentar mais sensores á unidade, de forma a permitir a recolha destes dados.

Relativamente à recolha de dados, podem ser escolhidos dois modos para efectuar as medidas. Há a possibilidade de efectuar medidas periódicas, para grandezas cuja variação é lenta, e por isso não se justifica uma leitura frequente (como a temperatura, a humidade ou a luminosidade). Mas também podem-se efectuar medidas contínuas, quando o valor da grandeza ultrapassa um determinado valor. Esta opção aplica-se principalmente no

acelerómetro, quando a aceleração ultrapassa um determinado valor, é feita uma medida ininterrupta durante 3 segundos.

Neste trabalho foram também desenvolvidas as comunicações entre a estação base e as estações móveis. Para isso, elaborou-se um protocolo que permite a comunicação entre as referidas estações. Este protocolo apenas admite a existência de uma estação base, no entanto pode estar equipada com 255 estações móveis. Isto acontece porque o endereço de cada estação base é um número inteiro de 8 bits, sendo 0 o endereço da unidade base. Esta estação é a que tem o controlo sobre o meio de transmissão e é a única que pode iniciar a transferência de dados. Este protocolo evita erros nas comunicações e assegura que todos os dados são enviados correctamente.

Finalmente, pode-se concluir que o objectivo final deste projecto, criação das estações e estação base da rede, foi atingido, tendo sido desenvolvido tanto o seu software como o hardware.

6.2. Trabalho futuro

No caso do espaço em memória não ser suficiente, ou porque foram adicionados sensores, ou porque se deseja aumentar o tempo de funcionamento do sistema, existe a possibilidade de se instalar uma unidade de memória flash externa. A ligação desta ao microcontrolador pode ser feita utilizando a porta SPI, que equipa o MSP430. Nas estações móveis os pinos que são utilizados por esta porta encontram-se livres, estando esta possibilidade já prevista.

O protocolo de comunicações pode ser, no entanto, alvo de melhorias que, por falta de tempo, não foram implementadas. Pode-se evoluir para uma comunicação multifrequência, equipando a base com mais do que um receptor, permitindo assim duas ou mais comunicações simultâneas. Possibilitando, deste modo, determinar uma frequência para comunicações de emergência, que só podem ser usadas em situações excepcionais como por exemplo em caso de falha na alimentação de uma estação, ou em caso de ocorrer um alarme com alguma grandeza que se pretenda medir. Desta maneira garante-se que estas comunicações têm sempre o meio livre para a transmissão.

Uma outra característica da rede que pode sofrer evolução é a topologia, passando para uma rede descentralizada, que permite a comunicação entre todas estações, aumentando assim o alcance geográfico da rede. Esta topologia deve permitir a reconfiguração automática em caso de alteração da disposição física das unidades.

Sendo esta uma rede de sensores móveis será também importante desenvolver um sistema que permita a localização de uma unidade móvel. Para isso pode ser utilizado um sistema de triangulação, tirando partido da capacidade que os componentes emissores/receptores RF têm em indicar a potência do sinal recebido, ou dos acelerómetros instalados nas unidades.

Este projecto é a base de um sistema de comunicação sem fios. Por isso, existem ainda hipóteses de melhoramentos, de evolução contínua e do seu alargamento, de modo a tornar-se um projecto sustentado e com possibilidades de comercialização, dada a sua possibilidade de aplicação em diferentes áreas.

Referências

1. *Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges*. Chee-Yee Chong, SriKanta P. Kumar. Agosto 2003, IEEE Proc.
2. Callaway, Edgar H. *Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols*. 2004.
3. Eren, Halit. *Wireless Sensor and Instruments: network, design, and applications*. 2006.
4. *System architecture directions for networked sensors*. Hill, J. ASPLOS 2000 : s.n., 2000.
5. Younis, Kemal Akkaya and Mohamed. A survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks.
6. Heinzelman, W. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*. 1999.
7. Estrin, D. Next century challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks. *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile Computing and Networking*. 1999.
8. W. Heinzelman. Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks. *Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences*. 2000.
9. Rodoplu, V. Minimum energy mobile wireless networks. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*. 1999.
10. Xu, Y. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. *Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*. 2001.
11. *Energy Scavenging From Low-Frequency Vibrations by Using Frequency Up-Conversion for Wireless Sensor Applications*. Najafi, Haluk Kulah e Khalil. s.l. : IEEE Sensors Jornal, 2008.
12. Imad Mahgoub, Mohammad Ilyas. *Smar Dust: Sensor Network Applications, Architecture, and Design*. 2006.
13. [Online]
http://cmmt.gatech.edu/Mark/Research/hi_vol_sol_cell_array_power_supply.html.
14. UC Berkeley. TinyOS Community Forum || An open-source OS for the networked sensor regime. [Online] 2004. <http://www.tinyos.net/>.

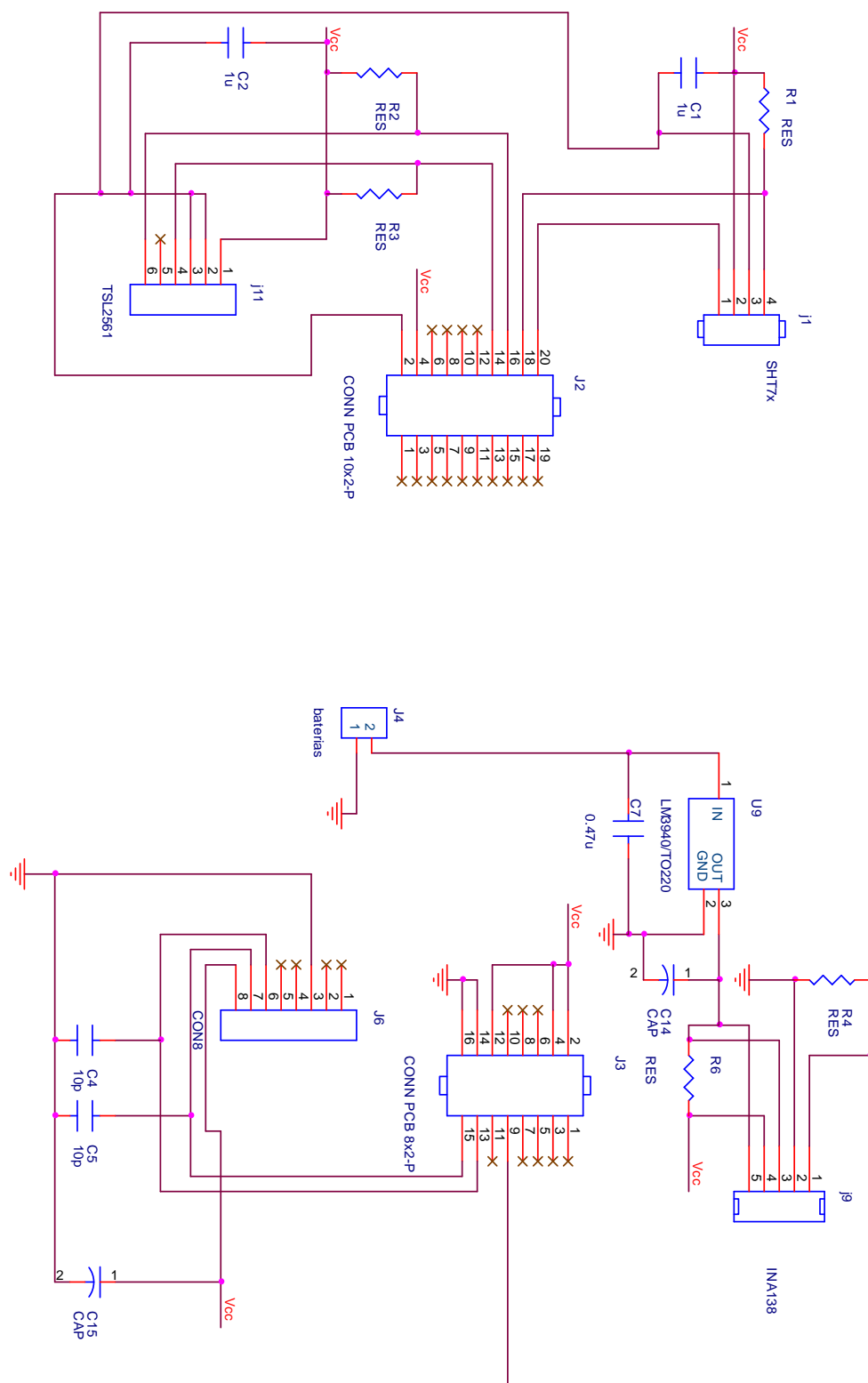
15. **Informations Society Technologies.** EYES - Dissemination. [Online] 2202. <http://www.eyes.eu.org>.
16. **Sentilla Corporation.** Sentilla | Moteiv Hardware Product Transition Notice. [Online] 2007. <http://www.sentilla.com/moteiv-transition.html>.
17. **Crossbow Technology Inc.** Crossbow Technology : Inertial Systems : Crossbow. [Online] 2008. <http://www.xbow.com/>.
18. **Intel Corporation.** Research - Research Areas - Sensor Nets / RFID. [Online] http://www.intel.com/research/exploratory/wireless_sensors.htm.
19. **Texas Instruments Incorporated.** RFID Systems, Texas Instruments. [Online] 2008. http://www.ti.com/rfid/?DCMP=TIHeaderTracking&HQS=Other+OT+hdr_p_tirfid.
20. **University of Alberta e Olsonet Communications Corp.** EcoNet: Project. [Online] <http://econet.cs.ualberta.ca/>.
21. **Information Technology for Assisted Living at Home (ITALH).** [Online] <http://www.eecs.berkeley.edu/~eklund/projects/ITALH/>.
22. **University of Virginia Department of Computer Science.** UVA Medical WSNs: AlarmNet. [Online] 2007. <http://www.cs.virginia.edu/wsn/medical/index.html>.
23. **MIT Media Lab.** sportSemble. [Online] 2007. <http://www.media.mit.edu/resenv/sportSemble/>.
24. **Paradiso, Joseph A.** CargoNet. [Online] 2007. http://www.media.mit.edu/resenv/cargonet_webFolder/intro.html.
25. **Richardson, Bennett.** New push for tsunami-alert system | csmonitor.com. [Online] 2005. <http://www.csmonitor.com/2004/1229/p01s03-woap.html>.
26. **University of Vermont.** University of Vermont: College of Engineering and Mathematical Sciences. *Snow Water Equivalent Monitoring with Wireless Sensor Networks*. [Online] 2007. <http://www.cems.uvm.edu/research/cems/snow/swe.php>.
27. *Measuring soil temperature using wireless MEMS sensors.* Jackson, T. 2007.
28. *Sensor Networking in Aquatic Environments - Experiences and New Challenges.* Voigt, Thiemo.
29. *Zigbee-based wireless sensor networks for nonitoring animal presence and pasture time in a strip of new grass.* Nadimi, E.S. 2007, Vol. Comput. Electron. Agric.
30. **Texas Instruments Incorporated.** *MSP430x43x1, MSP430x43x, MSP430x44x Mixed Signal Microcontroller, SLAS344F*. 2002.
31. —. *MSP430x44x User Guide, SLAU056G*. 2007.
32. *MSP430 Day 2008.* Texas Instruments. Lisboa : s.n., 2008.
33. **Olimex.** Development and Prototype boards and tools for PIC AVR and MSP430. [Online] 2007. <http://www.olimex.com/dev/index.html>.
34. **Texas Instruments.** MSP430 USB Debugging Interface - MSP-FET430UIF - TI Tool Folder. [Online] <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/msp-fet430uif.html>.

35. **IAR Systems.** MSP430 C/C++ compiler and IAR C-SPY debugger. [Online]
<http://www.iar.com/website1/1.0.1.0/220/1/index.php>.
36. **Analog Devices.** *ADXL330 Datasheet*. 2006.
37. **Sensirion.** *SHT1x/SHT7x Datasheet*. 2007.
38. **TAOS.** *TSL2560, TSL2561 Datasheet*. 2005.
39. **Burr-Brown Products.** *INA138, INA168 datasheet*. 2005.
40. **Easradio.** *ERx00-02 Series Datasheet (rev 2.4)*. 2006.
41. **National Semiconductor.** *LM3940 Datasheet*. 2007.
42. **Analog Devices.** *ADXL103/ADXL203 Datasheet*. 2006.
43. **Maxim Integrated Products.** Understanding SAR ADCs. [Online] 2001.
http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote_number/1080/CMP/WP-50.
44. **Kalinsky, David Kalinsky e Roee.** Introduction to I2C. [Online]
<http://embedded.com/story/OEG20010718S0073>.
45. **Miracle Concepts, Inc.** Lazarus Project. [Online] 2008.
<http://www.lazarus.freepascal.org/>.
46. **Stojmenovic, Ivan.** *Handbook of sensor networks: algorithms and architecture*. 2005.

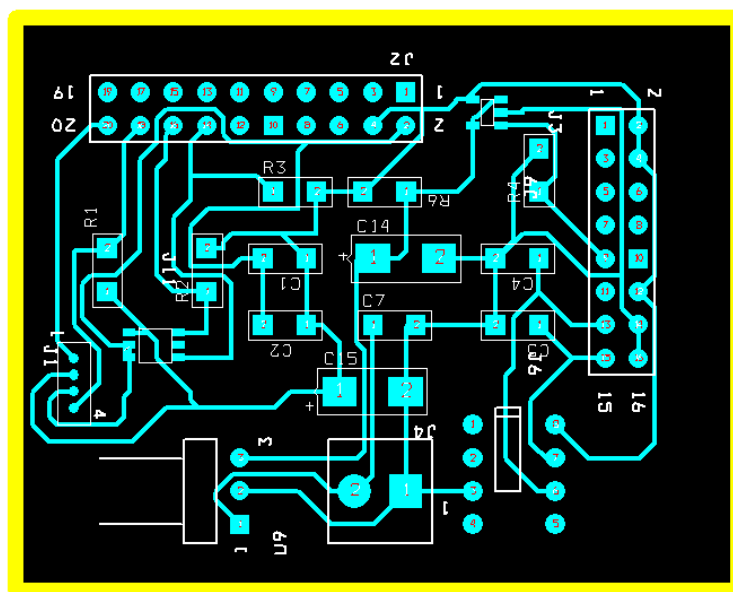
Anexos

Anexo 1- Circuito placa de sensores

1.1-ESQUEMÁTICO



1.2-PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

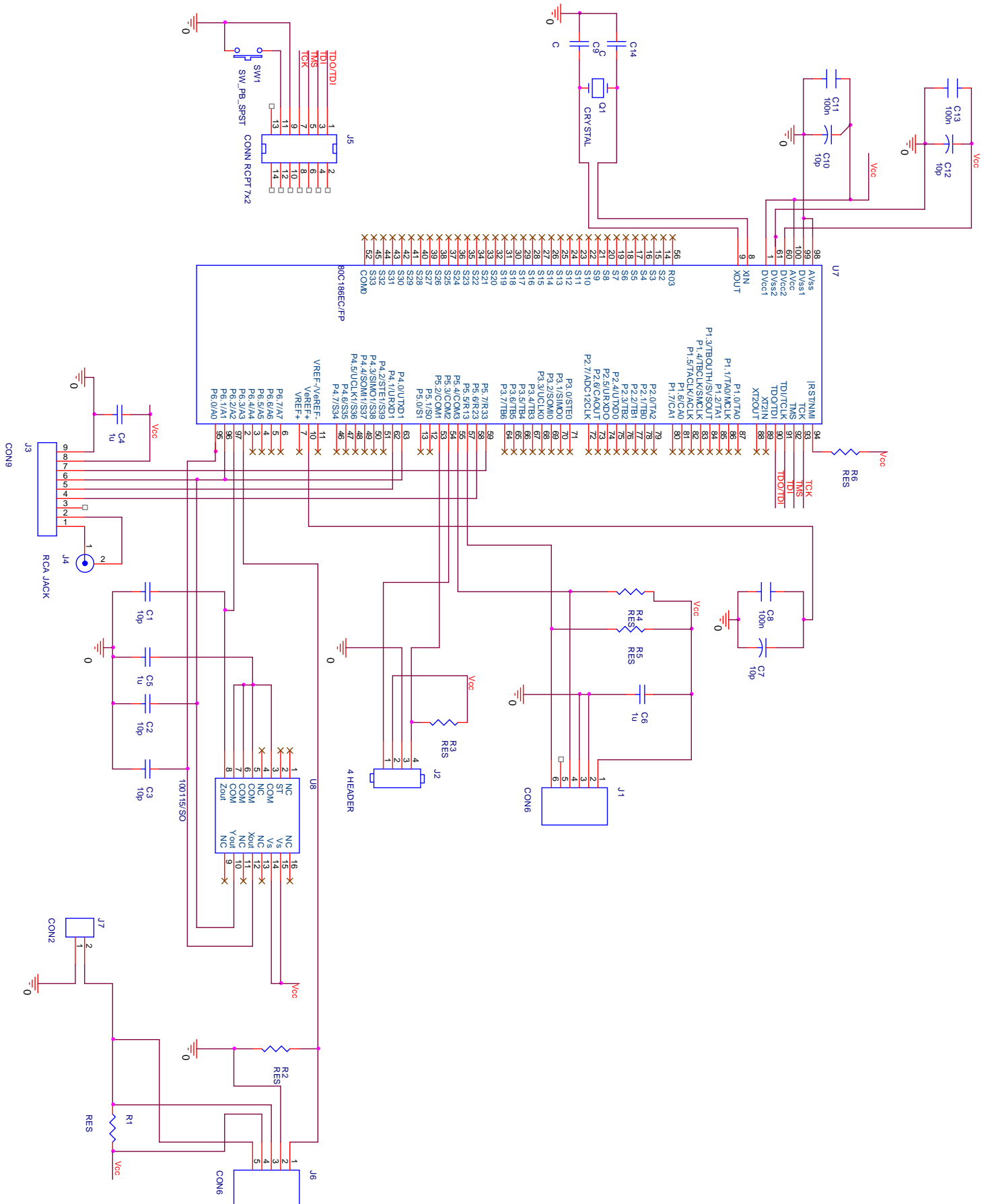


1.3-LISTA DE MATERIAIS

Item	Quantidade	Referência	Parte
1	2	C1,C2	1u
2	2	C4,C5	10p
3	1	C7	0.47u
4	2	C15,C14	CAP
5	1	J2	CONN PCB 10x2-P
6	1	J3	CONN PCB 8x2-P
7	1	J4	Baterias
8	1	J8	ADXL203
9	5	R1,R2,R3,R4,R6	RES
10	1	U9	LM3940/TO220
11	1	J1	SHT7x
12	1	J9	INA138
13	1	J11	TSL2561

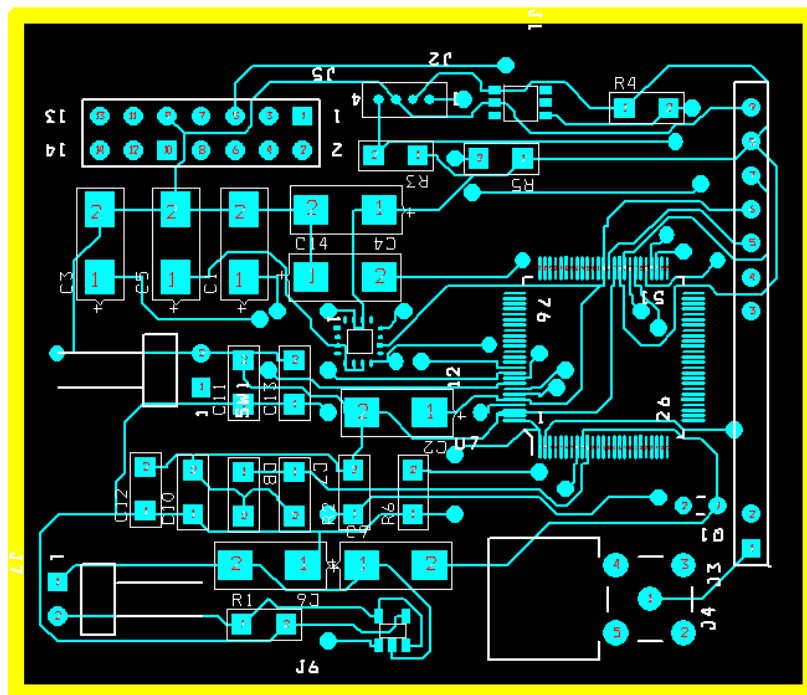
Anexo 2 - Circuito estação móvel:

2.1 - ESQUEMÁTICO

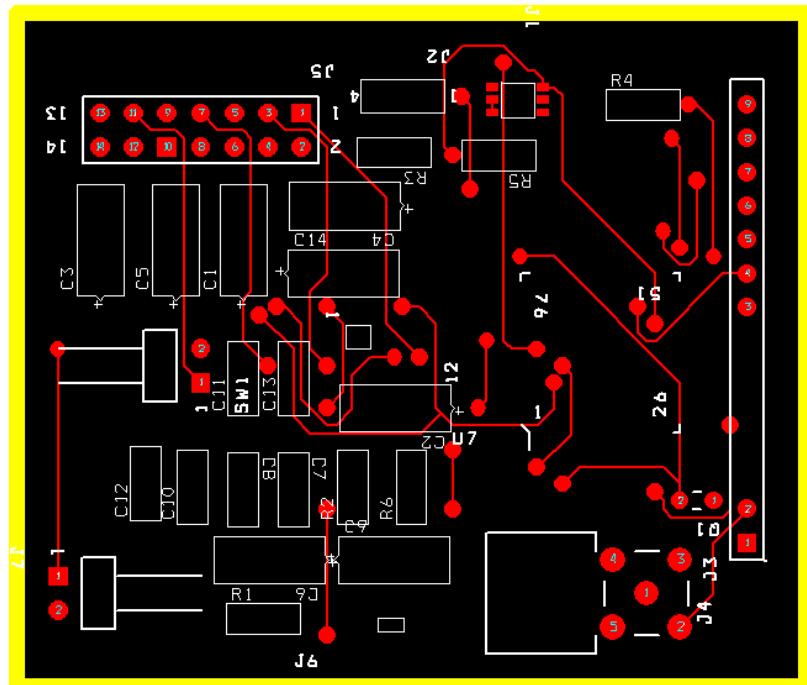


2.2- PLACAS CIRCUITO IMPRESSO

Vista de cima:



Vista de baixo:



2.3- LISTA DE MATERIAIS

<i>Item</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Referência</i>	<i>Parte</i>
1	6	C1,C2,C3,C7,C10,C12	10p
2	3	C4,C5,C6	1u
3	3	C8,C11,C13	100n
4	2	C9,C14	C
5	1	J1	TSL2561
6	1	J2	SHT7x
7	1	J3	ERx00TRS-02
8	1	J4	RCA JACK
9	1	J5	CONN RCPT 7x2
10	1	J6	INA138
11	1	J7	ALIMENTACAO
12	1	Q1	CRYSTAL
13	6	R1,R2,R3,R4,R5,R6	RES
14	1	SW1	SW_PB_SPST
15	1	U7	MSP430F449
16	1	U8	ADXL330